UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela de Posgrado

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

MODELO MATEMÁTICO DE LA COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LOS ACUÍFEROS A PARTIR DEL LANZAMIENTO DE *"Shotcrete"* EN UNIDADES MINERAS SUBTERRÁNEAS UBICADAS EN LA SIERRA CENTRAL DEL PERÚ, 2024

TESIS

PRESENTADA POR:

M.Sc. JORGE LUIS TOMAS FLOREZ SALAS

Para optar el Grado Académico de:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

TACNA – PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

MODELO MATEMÁTICO DE LA COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LOS ACUÍFEROS A PARTIR DEL LANZAMIENTO DE "*SHOTCRETE*" EN UNIDADES MINERAS SUBTERRÁNEAS UBICADAS EN LA SIERRA CENTRAL DEL PERÚ, 2024

Tesis sustentada y aprobada el 20 de agosto del 2024; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : .....

Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

SECRETARIO : .....

Dr. Julio Miguel Fernández Prado

MIEMBRO : .....

Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

ASESOR : .....

Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Dr. Dante Ulises Morales Cabrera, en mi condición de asesora acreditada con Resolución de Escuela de Posgrado N° 9780-2020-ESPG/UNJBG del 22 de diciembre del 2020, del trabajo de tesis titulado: *"Modelo matemático de la composición de las aguas residuales en los acuíferos a partir del lanzamiento de shotcrete en unidades mineras subterráneas ubicadas en la sierra central del Perú"*, presentado por el Sr. Jorge Luis Tomas Florez Salas, para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias Ambientales.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 9%.

Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis y está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado a solicitud del interesado con fines de continuar con los trámites respectivos para la obtención del Grado Académico de Doctor en Ciencias de Ambientales.

Tacna, 14 de junio del 2024.

FIRMA ASESOR
Nombres y apellidos

.....
Dr. Dante Ulises Morales Cabrera
DNI N° 00432101

FIRMA TESISTA
Nombres y apellidos

.....
Sr. Jorge Luis Tomas Florez Salas
DNI N° 00790320

DEDICATORIA

Este trabajo en primer lugar lo dedico a las dos mujeres más importantes en mi vida, mi amada esposa Silvia y a mi querida hija Mechita; además a mi querido ángel que está en el cielo y me cuida todos los días, mi “Negrita Toto”. Finalmente, a toda mi familia que hizo fuerza conmigo hasta el final para lograr el objetivo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a mi asesor, amigo Dante Morales, sin su apoyo no lo hubiera logrado; además a mis jurados revisores por ser tan exigentes en la redacción de la tesis y finalmente a mi asistente de cátedra de la UNAM Shamira Vizcarra y con ella a todo mi semillero de investigación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA iv
AGRADECIMIENTO v
RESUMEN xii
ABSTRACT xiii
RESUMO xiv
INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 5
1.1. Identificación del problema 5
1.2. Formulación del problema 8
1.2.1. Problema general 8
1.2.2. Problemas específicos 8
1.3. Justificación de la investigación 9
1.4. Objetivos 15
1.4.1. Objetivo general 15
1.4.2. Objetivos específicos 15
1.5. Hipótesis 15
1.5.1. Hipótesis general 15
1.5.2. Hipótesis específicas 16
1.6. Variables 16
1.6.1. Identificación de las variables 16
1.6.2. Caracterización de las variables 17
1.6.3. Definición Operacional de las variables 19
1.7. Limitaciones de la investigación: 19
1.8. Descripción de las características de la investigación 21
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 23
2.1. Antecedentes de la investigación 23
2.2. Definición de términos 24
2.3. Bases Teóricas 25
2.3.1. Geología Local 28
2.3.2. Descripción Litológica 32

2.3.3. Parámetros Geológicos 34
2.3.4. Caracterización de los estudios hidrogeológicos de las muestras del proyecto 73
2.3.5. Aplicación del *Shotcrete* 75
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 86
3.1. Caracterización, nivel y tipo del diseño de investigación 86
3.2. Población y/o muestra de estudio 86
3.2.1. Población 86
3.2.2. Muestra 87
3.3. Recopilación de Datos 87
3.3.1. Parámetros Físico Químicos de las Aguas Subterráneas. 87
3.4. Simulación en ambiente laboratorial 113
3.5. Análisis Estadístico 114
3.5.1. Ecuación para el Análisis matemático 115
CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN 117
4.1. Evaluación del contenido de potenciales contaminantes del *shotcrete* utilizado en cada una de las 05 unidades mineras 117
4.2. Resultados fisicoquímicos del contenido de contaminantes en una muestra sintética expuesta al contacto con el *shotcrete* 118
4.3. Contrastación de Hipótesis 140
DISCUSIONES 143
CONCLUSIONES 153
RECOMENDACIONES 155
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 157
ANEXOS 164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Tabla de clasificación geomecánica RMR* 35
Tabla 2 *Orientación de las secciones empleadas por estructura correspondiente a la Unidad Minera Carahuacra* 36
Tabla 3 *Resultados del mapeado geo mecánico obtenido de los sistemas de discontinuidades por cada veta* 39
Tabla 4 *Ensayos de campo - Ubicación de muestras para carga puntual* 41
Tabla 5 *Ensayos de campo - Resumen resultados carga puntual* 42
Tabla 6 *Ensayos de laboratorio - Ubicación de muestras* 42
Tabla 7 *Ensayos de laboratorio - Resumen resultados carga puntual* 43
Tabla 8 *Ensayos de laboratorio - Resumen resultados compresión uniaxial* 43
Tabla 9 *Ensayos de Laboratorio - Resumen resultados tracción indirecta* 44
Tabla 10 *Ensayos de laboratorio - Resumen resultados compresión triaxial* 44
Tabla 11 *Ensayos de laboratorio - Resumen resultados propiedades físicas* 45
Tabla 12 *Ensayos de laboratorio - Resumen resultados corte directo* 46
Tabla 13 *Clasificación geomecánica correspondiente por sectores* 48
Tabla 14 *Dominios geomecánicos por zona - GSI, UCS y tipo de roca* 50
Tabla 15 *Resumen de propiedades físicas (SVS 2014, DCR 2010)* 51
Tabla 16 *Resumen de propiedades físicas por litología (DCR, 2018)* 51
Tabla 17 *Resumen de propiedades físicas por litología (DCR, 2019)* 52
Tabla 18 *Sistemas de discontinuidades estructurales principales* 60
Tabla 19 *Sistemas de discontinuidades estructurales principales* 61
Tabla 20 *Moda de los aspectos estructurales de las diaclasas por litología* 63
Tabla 21 *Resultados de los ensayos de carga y descarga variable* 64
Tabla 22 *Resultados de los ensayos de corte directo* 65
Tabla 23 *Parámetros de resistencia de la masa rocosa* 66
Tabla 24 *Ensayos de laboratorio - Resumen resultados compresión uniaxial* 68
Tabla 25 *Ensayos de campo - Resumen resultados carga puntual* 69
Tabla 26 *Ensayos de laboratorio-Resumen resultados carga puntual* 69
Tabla 27 *Ensayos de Laboratorio-Resumen resultados tracción indirecta* 70
Tabla 28 *Ensayos de laboratorio - Resumen resultados compresión triaxial* 70

Tabla 29 *Ensayos de laboratorio-Resumen resultados corte directo* 71
Tabla 30 *Parámetros de resistencia de la masa rocosa* 72
Tabla 31 *Clasificación del agua según el pH* 73
Tabla 32 *Clasificación de masa de agua en función de la Conductividad eléctrica* 74
Tabla 33 *Clasificación de las aguas según la concentración de Sólidos Disueltos Totales* 75
Tabla 34 *Parámetros y porcentaje de dosificación de shotcrete en las Unidades Mineras* 79
Tabla 35 *Porcentajes de dosificación de shotcrete en las Unidades Mineras* 80
Tabla 36 *Parámetros y Porcentaje de Rebote por Mixer en las Unidades Mineras* 82
Tabla 37 *Porcentaje de Rebote por Mixer en las Unidades Mineras* 83
Tabla 38 *Consumo promedio de shotcrete por las Unidades Mineras* 84
Tabla 39 *Porcentaje del consumo promedio de shotcrete por las Unidades Mineras* ... 85
Tabla 40 *Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el primer muestreo (febrero) en el interior de la Mina Carahuacra* 90
Tabla 41 *Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el segundo muestreo (abril) en el interior de la Mina Carahuacra* 91
Tabla 42 *Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el interior de la mina Atacocha* 95
Tabla 43 *Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el interior de la mina Andaychagua* 101
Tabla 44 *Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en los piezómetros* 102
Tabla 45 *Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el interior de la Mina San Cristóbal* 106
Tabla 46 *Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en los piezómetros* 107
Tabla 47 *Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el interior de la Mina Milpo* 111

Tabla 48 *Promedio de los parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en las 5 unidades mineras* 112
Tabla 49 *Compuestos potencialmente contaminantes del shotcrete* 117
Tabla 50 *Resultados de la concentración de diferentes elementos presentes en el agua obtenidos de las cinco minas estudiadas* 118
Tabla 51 *Resultados de la presencia de aluminio* 119
Tabla 52 *Resultados de la presencia de bario* 120
Tabla 53 *Resultados de la presencia de calcio* 121
Tabla 54 *Resultados de la presencia de cobre* 122
Tabla 55 *Resultados de la presencia de estroncio* 123
Tabla 56 *Resultados de la presencia de hierro* 124
Tabla 57 *Resultados de la presencia de Magnesio* 125
Tabla 58 *Resultados de la presencia de molibdeno* 126
Tabla 59 *Resultados de la presencia de plomo* 127
Tabla 60 *Resultados de la presencia de potasio* 128
Tabla 61 *Resultados de la presencia de Sodio* 128
Tabla 62 *Resultados de la presencia de vanadio* 129
Tabla 63 *Resultados de la presencia de zinc* 130
Tabla 64 *Resultados de coeficientes PCA* 131
Tabla 65 *Correlación de componentes principales* 132
Tabla 66 *Análisis de varianza para la metodología de superficie de respuesta correspondiente a hierro* 133
Tabla 67 *Análisis de varianza para la metodología de superficie de respuesta correspondiente a potasio* 135
Tabla 68 *Análisis de varianza para la metodología de superficie de respuesta correspondiente a sodio* 136
Tabla 69 *Análisis de varianza para la metodología de superficie de respuesta correspondiente a zinc* 138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Seguridad en minería subterránea (2015)* 12
Figura 2 *Ubicación geográfica de las 5 unidades mineras de producción en la sierra central del Perú* 21
Figura 3 *Clasificación RMR en secciones transversales por estructura* 37
Figura 4 *Resumen de resultados martillo de geólogo* 41
Figura 5 *Clasificación RMR en la caja piso, mineral y caja techo por zonas* 47
Figura 6 *Clasificación RQD en la caja piso, mineral y caja techo por zonas* 47
Figura 7 *Zonificación geomecánica en planta (cuerpo galáctico)* 53
Figura 8 *Zonificación RMR en las secciones ST-02 y ST-03 (manto Principal Techo)* . 53
Figura 9 *Zonificación RMR en las secciones ST-04 a ST-09* 54
Figura 10 *Zonificación RMR en las secciones ST-10 a ST-13* 55
Figura 11 *Sección litológica de Prosperidad Techo-Nivel 1200* 57
Figura 12 *Sección litológica de Andaychagua Nivel 1200 TJ 500* 58
Figura 13 *Sección litológica de Salvadora Nivel 1300* 58
Figura 14 *Sección litológica de Prosperidad 1-Nivel 1200* 59
Figura 15 *Flowsheet de lanzado de shotcrete vía seca* 76
Figura 16 *Flowsheet de lanzado de shotcrete vía húmeda* 77
Figura 17 *Esquema del diseño de investigación Pre experimental* 86
Figura 18 *Estructura de simulación (malla + Shotcrete)* 113
Figura 19 *Estructura de simulación sumergida (malla + Shotcrete + agua destilada)* 114
Figura 20 *Relación de los componentes de las diferentes unidades mineras en una unidad de volumen (1l) mg/l* 115
Figura 21 *Superficie de respuesta del contenido de hierro* 134
Figura 22 *Superficie de respuesta del contenido de potasio* 136
Figura 23 *Superficie de respuesta del contenido de sodio* 138
Figura 24 *Superficie de respuesta del contenido de sodio* 139

RESUMEN

Esta investigación estudia la calidad fisicoquímica de los efluentes que se infiltran en los sistemas de fallas de rocas encajonantes en cinco unidades mineras subterráneas en la Sierra Central del Perú (Andaychagua, Carahuacra, San Cristóbal, El Porvenir y Atacocha), con el objetivo de modelar los cambios en la composición de los acuíferos confinados debajo de estos sitios. Utilizando datos de estudios hidrogeológicos y dosificaciones de *shotcrete* empleadas en la estabilización de minas, se desarrolló un modelo matemático para predecir las nuevas composiciones químicas generadas por reacciones químicas específicas. El estudio presenta una metodología aplicada y de nivel predictivo para modelar matemáticamente la composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados tras el uso de *shotcrete* en minas subterráneas de la sierra central del Perú. La investigación se clasifica como preexperimental, con el objetivo de establecer las bases para estudios más controlados en el futuro. El modelo matemático propuesto considera la contribución individual de cada componente químico detectado, así como sus interacciones, incluyendo un término adicional para contemplar posibles fuentes de contaminación o reacciones químicas no identificadas previamente. Este enfoque integra datos empíricos y estimaciones teóricas, permitiendo una mejor comprensión de la dinámica y el impacto de las actividades mineras en las aguas subterráneas. No se ha validado un modelo matemático para caracterizar la nueva composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados a partir del uso de *shotcrete* en minas subterráneas. Sin embargo, se ha determinado que la presencia de aditivos, cemento y agregados en el *shotcrete* genera variaciones en el pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos de estas aguas, representando un riesgo de contaminación significativo para los acuíferos ubicados en la sierra central del país. Los resultados esperan mejorar los procesos de monitoreo y garantizar la calidad de vida de las poblaciones locales, aumentando la efectividad de las medidas preventivas y correctivas frente a los impactos ambientales de la minería subterránea.

Palabras clave: Minería, efluentes, acuíferos, modelización matemática, calidad de agua, contaminación, *shotcrete*.

ABSTRACT

This research studies the physicochemical quality of the effluents that infiltrate the casing rock fault systems in five underground mining units in the Central Highlands of Peru (Andaychagua, Carahuacra, San Cristóbal, El Porvenir and Atacocha), with the aim of modeling the changes in the composition of the aquifers confined below these sites. Using data from hydrogeological surveys and *shotcrete* dosages used in mine stabilization, a mathematical model was developed to predict the new chemical compositions generated by specific chemical reactions. The study presents an applied methodology and predictive level to mathematically model the chemical composition of wastewater that infiltrates the aquifers confined after the use of *shotcrete* in underground mines in the central highlands of Peru. The research is classified as pre-experimental, with the aim of laying the groundwork for more controlled studies in the future. The proposed mathematical model considers the individual contribution of each detected chemical component, as well as their interactions, including an additional term to contemplate possible sources of contamination or previously unidentified chemical reactions. This approach integrates empirical data and theoretical estimates, allowing a better understanding of the dynamics and impact of mining activities on groundwater. A mathematical model has not been validated to characterize the new chemical composition of wastewater infiltrating confined aquifers from the use of *shotcrete* in underground mines. However, it has been determined that the presence of additives, cement and aggregates in the *shotcrete* generates variations in the pH, electrical conductivity and total dissolved solids of these waters, representing a significant risk of contamination for the aquifers located in the central mountains of the country. The results hope to improve monitoring processes and guarantee the quality of life of local populations, increasing the effectiveness of preventive and corrective measures against the environmental impacts of underground mining.

Keywords: Mining, effluents, aquifers, mathematical modelling, water quality, pollution, *shotcrete*.

RESUMO

Esta investigação estuda a qualidade físico-química dos efluentes que percolam nos sistemas de falhas do leito rochoso de cinco unidades mineiras subterrâneas no Planalto Central do Peru (Andaychagua, Carahuacra, San Cristobal, El Porvenir e Atacocha), com o objetivo de modelar as alterações na composição dos aquíferos confinados sob estes locais. Utilizando dados de estudos hidrogeológicos e dosagens de betão projetado utilizadas na estabilização de minas, foi desenvolvido um modelo matemático para prever as novas composições químicas geradas por reações químicas específicas. O estudo apresenta uma metodologia aplicada, de nível preditivo, para modelar matematicamente a composição química das águas residuais que se infiltram em aquíferos confinados após a utilização de betão projetado em minas subterrâneas no planalto central do Peru. A investigação é classificada como pré-experimental, com o objetivo de estabelecer a base para estudos mais controlados no futuro. O modelo matemático proposto considera a contribuição individual de cada componente químico detectado, bem como as suas interações, incluindo um termo adicional para ter em conta possíveis fontes de contaminação ou reacções químicas não identificadas anteriormente. Esta abordagem integra dados empíricos e estimativas teóricas, permitindo uma melhor compreensão da dinâmica e do impacto das actividades mineiras nas águas subterrâneas. Não foi validado um modelo matemático para caraterizar a nova composição química das águas residuais que se infiltram em aquíferos confinados devido à utilização de betão projetado em minas subterrâneas. No entanto, determinou-se que a presença de aditivos, cimento e agregados no betão projetado gera variações no pH, na condutividade eléctrica e nos sólidos totais dissolvidos destas águas, representando um risco de contaminação significativo para os aquíferos localizados no planalto central do país. Os resultados esperam melhorar os processos de monitoramento e garantir a qualidade de vida das populações locais, aumentando a eficácia das medidas preventivas e corretivas contra os impactos ambientais da mineração subterrânea

***Palavras-chave*:** Mineração, efluentes, aquíferos, modelagem matemática, qualidade da água, contaminação, concreto projetado

INTRODUCCIÓN

En la presente investigación, se busca conocer las características fisicoquímicas de calidad de agua residual (efluentes) que se infiltran en los sistemas de fallas locales de las rocas encajonantes de 05 unidades mineras subterráneas que se localizan en la sierra central del país (Andaychagua, San Cristóbal, Carahuacra, El Porvenir y Atacocha) y que contaminan los acuíferos confinados que se encuentran por debajo del nivel freático de dichos emplazamientos mineros; estos datos obtenidos permitirán a la autoridad nacional competente (OEFA) poder incrementar y/o modificar sus puntos de monitoreo de calidad de agua cuando se lleve a cabo la supervisión de las unidades mineras que estén en operación, paralización temporal o que se encuentren implementando sus planes de cierre final; ya que, en la actualidad, dichos puntos de monitoreo se restringen solamente a tomar muestras en las bocaminas y, asimismo, en bocatomas de salida de agua de las instalaciones de las plantas de tratamiento de efluentes antes de ser vertidos a un curso natural de agua, según señala la normatividad nacional; esto de acuerdo a los requerimientos de monitoreo de las secciones mínimas de canales de derivación, así como de la integridad de los canales, alcantarillado y otras estructuras necesarias para el transporte de agua después del cierre (MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS, 2006). Además, según la ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental, la entidad competente (OEFA) en calidad de fiscalizador, tiene la autorización para realizar pruebas en los puntos de monitoreo, así como tomar o sacar muestras de sustancias y materiales empleados en el establecimiento, realizar mediciones, obtener fotografías y/o grabaciones, elaborar croquis y planos, etc.; asimismo, se puede llevar a cabo cualquier otro tipo de medio probatorio que sirva para sustentar lo verificado durante las acciones de supervisión (Ley 30011, 2013, Art. 15).

Para entender el motivo por el que se genera esta condición en las minas subterráneas, es necesario conocer que la actividad minera subterránea requiere necesariamente que se ejecuten diferentes labores de desarrollo, preparación y explotación para extraer el recurso mineral; y para tal fin, es necesario perforar un sistema de túneles, el cual comprenderá la excavación y construcción de una serie de excavaciones conectadas entre sí empleando métodos de excavación subterránea

predeterminados en base a las condiciones del terreno, los cuales irán adoptando diversos nombres específicos en función a sus usos y dimensiones hasta llegar a la zona mineralizada (ver Figura 1), este proceso es denominado “ciclo de minado”.

El ciclo de minado se define como el orden de extracción o secuencia de explotación a realizar en la etapa operacional de una unidad minera, así como la aplicación de una estrategia de leyes de corte variables a través del tiempo en la cual se calcula la manera de decidir el destino de todo material que es extraído desde el tajo (por ejemplo; si va destinado al proceso o desmonte) teniendo en cuenta las capacidades de la mina cuyos límites están establecidos por variables operacionales, económicas y comerciales. Un problema que se afronta frecuentemente en el proceso de lograr una secuencia óptima de explotación de una mina, es la intervención de factores técnicos y económicos. Por ende, una vez definidos los límites de la explotación, se procede a establecer la secuencia de explotación a seguir, tanto del mineral como del estéril (Deudor, 2019).

Asimismo, demandará de otras actividades agrupadas en lo que la actividad minera conceptúa como “servicios auxiliares”, los cuales complementarán la ingeniería necesaria para lograr que la explotación minera sea de forma sostenida. Cabe resaltar la importancia de los servicios auxiliares mineros para el desarrollo óptimo de las operaciones mineras a fin de que la obtención de los minerales de un determinado yacimiento se lleve a cabo de la manera más eficiente y segura para los trabajadores involucrados. Estos abarcan diferentes servicios como: el suministro de agua potable y energía eléctrica, ventilación, aire comprimido y extracción de aguas subterráneas (bombeo) para llevar a cabo las operaciones en los frentes de trabajo, buscando un uso racional de la energía y aprovechamiento de los recursos (Cardona, 2021).

Una de estas actividades complementarias consiste en extraer los efluentes del interior de las minas subterráneas mediante un sistema de bombeo que es implementado por el titular de la actividad minera antes de verter su caudal a los cursos naturales en superficie para ser usados en las actividades propias de las comunidades de la zona de influencia directa y/o indirecta (agricultura, ganadería e inclusive para uso doméstico);

sin embargo, existe un remanente de efluentes que no se extrae del interior de las unidades mineras, quedando un porcentaje que oscila entre el 3 % y 5 % aproximadamente el cual se infiltra directamente a los acuíferos de tipo confinado que existen en la Cordillera de los Andes y que discurren de forma subterránea con dirección a manantiales quebrada abajo u ojos de agua en los cauces de los ríos o sino directamente al océano pacífico. En ese sentido podemos inferir lo siguiente, De todos los problemas medioambientales que afronta el ser humano, la contaminación de las fuentes de agua, superficiales y subterráneas, es la más preocupante por el aumento de los elementos tóxicos provenientes de los efluentes generados por la actividad del hombre (Fatih, 2013).

En la sierra de nuestro país, se presenta la mayor cantidad de precipitación pluvial que constituye la zona de alimentación y recarga de los acuíferos subterráneos más importante del Perú. El carácter montañoso de la sierra, conformada por la cordillera de los Andes y surcada por ríos profundos, evidencia la presencia de acuíferos fisurados, confinados y kársticos. En el caso de los acuitardos conformados por rocas sedimentarias como lutitas, limoarcillitas y rocas compactas sin fracturamiento de toda la secuencia estratigráfica de la cuenca, conforman el basamento impermeable de los acuíferos y en la mayoría de los casos representan estratos impermeables confinantes que dan origen a los acuíferos multicapa y confinados, estos acuíferos se localizan en la cuenca alta, contribuyen a la recarga y almacenamiento de agua subterránea en los acuíferos a lo largo en época de lluvia manteniendo un caudal constante en la descarga durante la época de estiaje.

Asimismo, Andreo et al. (2005), señalan lo siguiente:

En condiciones de estiaje existe un flujo lento a través de la potente zona no saturada del acuífero (del orden de 1 km de espesor). Sin embargo, el sistema responde rápidamente ante las precipitaciones con aumentos de caudal y diluciones de la composición química del agua de los manantiales, lo cual demuestra la existencia de una red kárstica en su interior que permite el drenaje rápido en condiciones de recarga. Este aspecto es importante en términos de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. Un contaminante potencial que se infiltrara en el acuífero a finales de estiaje, podría

permanecer varios meses en el acuífero, aunque posiblemente sería eliminado en las posteriores épocas de recarga.

En ese sentido y como ya se ha mencionado, el propósito de esta investigación consiste en dimensionar la calidad del efluente que contamina dichos acuíferos a partir del uso de *shotcrete* para el sostenimiento de las labores mineras subterráneas en éstas 05 unidades mineras.

Por lo tanto, el resultado que se espera obtener al finalizar este trabajo de investigación es la posibilidad de modelar los componentes fisicoquímicos de los efluentes de estas cinco unidades mineras que se encuentran en la sierra central del país, a partir de los datos obtenidos de sus respectivos estudios hidrogeológicos combinándolos con dosificaciones de *shotcrete* que se usan en cada una de las unidades mineras evaluadas en este trabajo de investigación dentro de un ambiente recreado en laboratorio para obtener las nuevas composiciones químicas que se estarían generando a partir de las reacciones químicas por cada unidad minera evaluada; de tal forma que, podamos ofrecer a la entidad del estado competente (OEFA) la posibilidad de mejorar sus procesos de monitoreo de efluentes en la actividad minera para garantizar una mejor calidad de vida para las poblaciones que se encuentran en las áreas de influencia en donde se realiza actividad minera en general.

Esto en concordancia con una de las funciones de fiscalización directa de dicha entidad competente, la cual comprende “realizar acciones de vigilancia, monitoreo y otras similares para prevenir impactos ambientales y determinar presuntas responsabilidades en caso se detecten incumplimientos a la normativa ambiental” (MINAM, n.d.).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

En la actualidad, existen diferentes métodos de explotación en los sistemas de explotación subterránea en el Perú y el mundo, sin embargo, éstos no contemplan dentro de sus costos operativos la evacuación y canalización del 100 % de los efluentes. Estos se generan en las diferentes labores mineras en interior mina para su posterior tratamiento antes de ser vertidos a algún cauce natural en superficie. Esto ocurre principalmente en la sierra central del país, que es donde se concentra la mayor cantidad de minas subterráneas del país, ya que su estructura mineralizada por lo general es de tipo veta o filón. Un yacimiento de tipo veta se conoce como aquella zona de mineralización de gran longitud que posee un ángulo de buzamiento pronunciado, éstas pueden ser angostas de poca potencia (<3m) o de gran potencia (>3m) las cuales están limitadas por rocas irregulares denominadas "rocas encajonantes". La mineralización de una veta puede ser internamente heterogénea lo cual dependerá de las estructuras en intersección, normalmente este tipo de yacimiento es vertical, sin embargo, cuando el cuerpo mineralizado se presenta de forma tendida o echada adopta el nombre de "manto". En ambos casos el incremento de los costos operativos de producción haría más complicado que dicha unidad minera pueda explotar el mineral y que genere un beneficio económico.

Es necesario señalar que, en la actividad minera subterránea, no todo el efluente que se encuentra dentro de las diferentes labores mineras es encausado en las cunetas (canales) y llevadas posteriormente a las pozas de sedimentación en los diferentes niveles del sistema de bombeo que existen en el interior de la mina subterránea. Más aún si se tiene en cuenta que, por la naturaleza del tipo de yacimiento especificado en el presente trabajo (tipo veta principalmente), el agua en interior mina invade los límites de las rocas encajonantes y la zona mineralizada discurriendo de forma no cuantificada por todo el sistema de fallas locales y regionales que conforman el yacimiento minero. En este sentido, es el agua existente bajo la superficie del terreno (es decir, situada bajo el nivel freático) que está saturando completamente las fracturas y fisuras del terreno.

Es importante recalcar que, el uso de un sistema de bombeo garantiza que el proceso de producción no se vea perjudicado, por esta razón, la selección de un adecuado sistema de bombeo en concordancia con el cuidado de que se cumpla el correcto equilibrio hidráulico es necesario para que el sistema evite causar pérdidas económicas y técnicas a razón de equipos muy potentes cumpliendo una eficiencia baja o equipos con capacidad insuficiente.

De otro lado habíamos señalado la importancia y el propósito de implementar un sistema de bombeo que se encarga de extraer los efluentes de los socavones (agua, lodos, efluentes, etc.), existen bombas centrífugas o rotodinámicas, las cuales basan su mecanismo principalmente en el uso de la energía mecánica convirtiéndola en energía hidráulica, además de caracterizarse por poseer un movimiento rotativo. Por otro lado, se encuentran las bombas volumétricas que usan la energía mecánica transformándola en energía de presión debido al desplazamiento de los fluidos en su interior.

Para determinar un sistema adecuado de bombeo, se debe contemplar, en primer lugar, una evaluación del fluido que se bombeará seguido de la selección del diseño según la aplicación que tendrá, de igual manera, la evaluación de la eficiencia según sus propios parámetros (caudal, presión, potencia eléctrica, altura, etc.) y posibles fallas en la roca encajonante para evitar problemas en el proceso de producción.

Según lo expuesto, se puede inferir que los efectos de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados pueden ser de tipo geomorfológico, geomecánico, hidráulico, hidrológico y de calidad del agua, especialmente, sus características fisicoquímicas (Ferret et al., 2017).

En cuanto al tipo geomorfológico, son muy numerosos este los efectos que derivan de sucesos como la erosión lineal o marginal del cauce, cambios en su sección transversal, acorazamiento del lecho, entre otros. De todos ellos, la incisión del cauce, unida a la erosión transitoria del lecho en sucesos de avenidas o crecidas, constituye el proceso inducido más sintomático y notorio por cuanto afecta directamente al nivel freático y a las infraestructuras viarias e hidráulicas que lo atraviesan.

También se evidencian efectos geomecánicos, en el que se determina cómo el agua subterránea afecta el comportamiento mecánico de las rocas de caja y de los procesos inherentes a la estructura mineralizada. El agua subterránea altera el comportamiento mecánico de las rocas y determina 2 efectos; el más obvio es el que ocurre en la operación: la Ley del Esfuerzo Efectivo; es decir que, el agua bajo presión en las uniones que definen bloques reduce el esfuerzo normal efectivo entre las superficies de las rocas, por lo tanto, reduce la potencial resistencia al corte. En las rocas porosas, como la arenisca, la Ley del Esfuerzo Efectivo tiene un comportamiento igual que al de suelos granulares ya que, el efecto de fisuras, fracturas o poros de agua bajo presión reducen el esfuerzo último del macizo (Rosado, 2015).

Con respecto a la tipificación hidráulica, se caracteriza por que la hidráulica subterránea trata sobre la física del agua en el medio subterráneo. Por tanto, la hidráulica de captaciones estudia concretamente los efectos producidos por la extracción de agua mediante captaciones (excepcionalmente, inyección de agua a través de las captaciones) (Sánchez, 1982).

Cabe mencionar que, en un tipo hidrológico, la comprensión del ciclo hidrológico es esencial para el manejo eficiente del agua de lluvia y del agua del suelo. El agua subterránea se mueve muy lentamente a través de los materiales del subsuelo en dirección del curso de drenaje dominante, el agua que es recogida por una cuenca fluirá hacia el punto de salida más bajo donde puede unirse al agua que emerge de otras microcuencas (Shaxson & Barber, s.f.).

Las características fisicoquímicas del agua son un factor significativo puesto que el agua subterránea natural, como consecuencia de su composición química y de acciones naturales externas, presenta una serie de propiedades o características fisicoquímicas: color, turbidez, sabor, temperatura, conductividad eléctrica. dureza, etc. Estas propiedades varían en el espacio y en el tiempo conforme al ambiente en que se encuentran y posible contacto con sustancias químicas a las que se ven expuestas, alterando su composición.

En tal sentido, el enfoque de la tesis está dirigido a caracterizar mediante un modelo matemático, la nueva composición química de las aguas residuales de los acuíferos confinados y sus características fisicoquímicas que se encuentran por debajo de las instalaciones mineras subterráneas en las unidades mineras de la sierra central del Perú. Minas que se encuentran en la actualidad en operación, paralización temporal o en la etapa de cierre de mina.

Esta propuesta de modelos matemáticos resuelve analíticamente ecuaciones complejas para obtener ecuaciones simples para el flujo y el transporte de contaminantes, proporcionando soluciones exactas a las mismas para lo que requieren que se asuman diversas simplificaciones (Ordoñez, 2011).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el modelo matemático para la nueva composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados a partir del lanzamiento de "*shotcrete*" en las unidades mineras subterráneas?

1.2.2. Problemas específicos

Para responder a la pregunta del problema general se plantean las siguientes preguntas específicas:

a) ¿Cuál es la composición química que comprende a los parámetros fisicoquímicos del agua residual (conductividad, la dureza, el total de sólidos disueltos - TDS y el pH) con añadido de "*shotcrete*" en un medio acuoso de las unidades mineras subterráneas bajo condiciones laboratoriales?
b) ¿Qué productos se generan a partir de la reacción de los compuestos químicos que comprende a los parámetros fisicoquímicos del agua residual (conductividad, la dureza, el total de sólidos disueltos - TDS y el pH) con añadido de "*shotcrete*" en

un medio acuoso de las unidades mineras subterráneas bajo condiciones laboratoriales?

1.3. Justificación de la investigación

El estudio es conveniente, porque permitirá caracterizar la composición química de los acuíferos confinados en las unidades mineras de la sierra central del Perú, a partir de los parámetros químicos de las aguas residuales de la minería subterránea en la que se utiliza "*shotcrete*".

La trascendencia social del estudio se concreta en el propósito de aportar al conocimiento de posibles fuentes de contaminación de las aguas subterráneas, especialmente en las áreas en las que se desarrolla la actividad minera (Romero et al., 2006). Los hallazgos beneficiarán a los decisores en la gestión de supervisión de la calidad de agua dentro del marco de la gestión medioambiental, e indirectamente a la población, ya que coadyuvará a la solución del problema identificado. Asimismo, los resultados en gran medida podrían generalizarse a situaciones similares en el campo de la industria e ingeniería vinculada a la actividad minera.

En ese sentido el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), en el sector minero, cumple con funciones de fiscalización ambiental según lo establecido en el Art. 91 en la Ley General de Minería, en el que establece que el encargado de fiscalizar la mediana y gran minería es dicha entidad competente (OEFA), mientras que, para los pequeños mineros y artesanales, los encargados vienen a ser los gobiernos regionales. Dentro de las funciones del OEFA, según la Ley 30011, el ejercicio de la fiscalización ambiental comprende las funciones de evaluación, supervisión, fiscalización y sanción destinadas a asegurar el cumplimiento de las obligaciones ambientales fiscalizables establecidas en la legislación ambiental, así como de los compromisos derivados de los instrumentos de gestión ambiental y de los mandatos o disposiciones emitidos por el OEFA (Ley 30011, 2013, Art. 11.1).

Tomando en cuenta lo mencionado en el anterior párrafo, dentro de sus funciones evaluadoras, el OEFA comprende (para asegurar el cumplimiento de todas las normas

ambientales) la vigilancia, el monitoreo y acciones similares, así como funciones fiscalizadoras y sancionadoras, de modo que, se realicen investigaciones de posibles incumplimientos de las normas, compromisos ambientales y mandatos a fin de establecer las sanciones adecuadas.

El OEFA, en ejercicio de su función supervisora, puede establecer de manera complementaria procedimientos para la entrega de reportes, informes técnicos, declaraciones de parte y cualquier información relativa al cumplimiento de las obligaciones a cargo de los administrados (Ley 30011, 2013, Art. 13). Dentro de sus otras funciones, se encuentra el realizar reportes sobre el cumplimiento, así como detectar declaraciones o información falsa para aplicar las sanciones correspondientes por el incumplimiento del administrado.

En cuanto a sus competencias en el ámbito de la fiscalización, de la Ley 30011 se señala lo siguiente: “El OEFA, directamente o a través de terceros, puede ejecutar las acciones necesarias para el desarrollo de sus funciones de fiscalización, para lo cual contará con las siguientes facultades: (...) c.4) Tomar o sacar muestras de sustancias y materiales utilizados o manipulados en el establecimiento, realizar mediciones, obtener fotografías, vídeos, grabación de imágenes, levantar croquis y planos o utilizar cualquier otro tipo de medio probatorio que sirva para sustentar lo verificado durante las acciones de supervisión” (Ley 30011, 2013, Art. 15).

Por lo tanto, la actividad minera subterránea requiere necesariamente que se ejecuten diferentes labores de desarrollo, preparación y explotación para extraer el mineral que, por lo general, se encuentra asociado en varios tipos de yacimientos de minerales. Para poder lograrlo, es necesario perforar un sistema de excavaciones que van adoptando diversos nombres específicos en función a sus usos y dimensiones hasta llegar a la zona mineralizada. En este proceso denominado “ciclo de minado subterráneo”, se requiere de diversas labores mineras subterráneas tales como rampas, cruceros, tajos de explotación, talleres de mantenimiento mina, polvorines, y otros, los cuales constituyen una red de accesos a interior mina y son esenciales para llevar a cabo una óptima secuencia de explotación.

Entre ellas se conocen las rampas, que son labores subterráneas inclinadas (con una pendiente aproximada de 12 %) las cuales son construidas para la comunicación entre niveles y hacia la superficie. La sección de éstas debe ser lo suficientemente amplia para permitir el transporte del mineral extraído por medio de camiones mineros u otros equipos de transporte hacia la superficie.

Un crucero es una labor horizontal que se desarrolla para intersecar una veta, asimismo, un crucero principal sirve como labor de acceso al depósito mineral, acceso para personal, herramientas y equipos, reconocer la continuidad del yacimiento, así como otras estructuras perpendiculares a la labor (Huayta, 2022).

Los tajos de explotación, según Rivera (2015), “son aquellas labores temporales destinadas a la extracción del mineral” (pág. 61).

El taller de mantenimiento de una unidad minera es aquella área de trabajo designada para realizar mantenimiento (ya sea preventivo y/o correctivo) de los equipos empleados en los procesos operativos, en la cual se tienen habilitadas diferentes zonas como un área de soldadura, suministro de energía eléctrica y agua, área de lubricación/engrase y suministro de aceite, cambio de neumáticos, entre otros.

Las zonas de mantenimiento preventivo o de inspecciones, “se asienta en un conjunto de inspecciones periódicas que buscan detectar condiciones que pudieran causar descomposturas, pausas en la producción o pérdidas materiales a fin de controlar, eliminar o evitar tales eventualidades en sus primeras etapas” (Klimasauskas, n.d.). Mientras que el mantenimiento correctivo o mantenimiento por avería, “consiste en el conjunto de tareas destinadas a colocar el activo averiado en condiciones operativas luego que haya ocurrido un daño, ocasionando paradas no programadas” (Klimasauskas, s.f.).

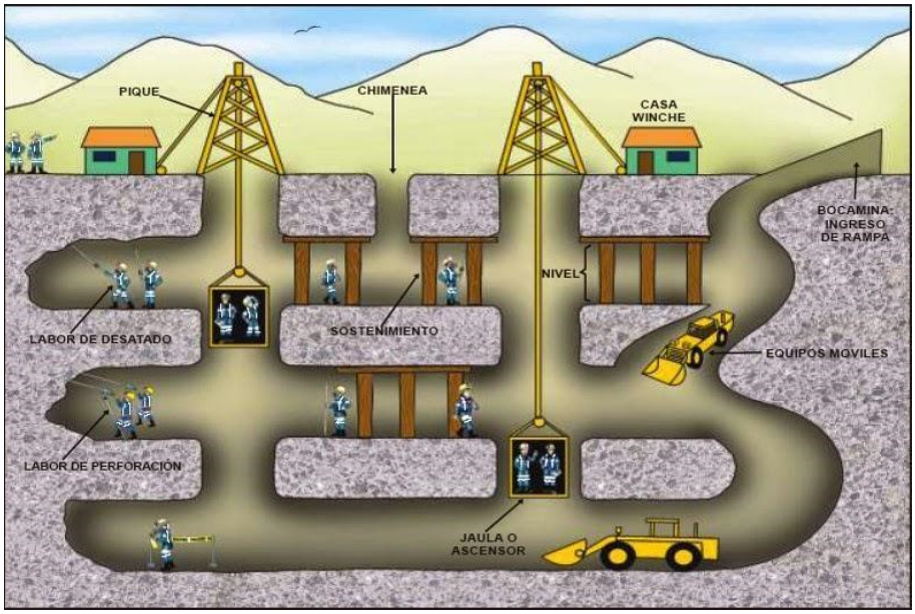
Un polvorín es un almacén cuyo uso es exclusivo para almacenar material explosivo y sus accesorios de iniciación, teniendo en cuenta que deben almacenarse por separado, es decir, en polvorines diferentes.

Un sistema de bombeo en actividades mineras subterráneas entra en funcionamiento cuando los efluentes, producto de procesos y excavaciones, se debe bombear e impulsar para ser evacuada hacia la superficie para poder continuar con la producción de manera efectiva.

Además, se requieren de otros servicios auxiliares tales como la ventilación, sostenimiento, iluminación, riego de vías, etc. empleando agua en su proceso, para el desarrollo y explotación del mineral en el interior de la mina; además existe la presencia de agua producto de las filtraciones de las rocas encajonantes del área mineralizada que se van acumulando en las labores mineras subterráneas como se ve en la Figura 1.

Figura 1

Seguridad en minería subterránea (2015)



Nota. Recuperado de Blogspot (2015).

Asimismo, cabe enfatizar que, basado en la realidad de la explotación minera mecanizada, en la que se necesita de mayor cantidad de agua para poner en operación los Jumbos (perforadoras mecánicas), equipos que contemplan dentro de sus partes a un conjunto de brazos articulados acoplados a martillos roto-percutivos que cumplen con la principal tarea de perforación y son utilizados en minería subterránea. Respecto a las perforadoras Jack Leg (perforadoras neumáticas), las cuales son empleadas para ejecutar

perforaciones logrando realizar taladros horizontales e inclinados con ayuda de una barra de avance que conforma parte de este equipo, se emplean también en la construcción de rampas y galerías. Se puede establecer así una estimación de 10 a 1 en términos de unidades de volumen de requerimiento de agua, esto se explica de tal manera que, al tratarse de los equipos Jumbo, la cantidad de agua requerida se emplea principalmente en el sistema hidráulico y la parte mecánica del equipo, así como en refrigerar la boca de la perforación, arrastrar los detritus, entre otros. Por su parte, la perforadora Jack Leg, al ser un equipo de dimensiones más pequeñas, su consumo de agua es menor; principalmente en el sistema de agua que llega por medio de mangueras hacia la perforadora. Esto determina que el agua acumulada en los frentes de perforación se percola directamente en la masa rocosa. Así también, los procesos de sostenimiento de los frentes de las labores mineras también requieren dichos equipos, lo que genera un mayor nivel de infiltración de agua, que no es canalizada hacia las cunetas del sistema de drenaje y bombeo de las minas subterráneas, sino hacia los acuíferos confinados.

Es relevante mencionar que esta deficiencia del sistema de drenaje debería de contemplar una mejora en la gestión partiendo por asegurar la efectividad, fiabilidad y el correcto posicionamiento con el que se pueda captar y transportar, aspirando con el mínimo posible de pérdida en los diferentes niveles de la mina y cuidando que dichas infraestructuras no lleguen a perjudicar las labores mineras por su ubicación. Siendo el propósito de un sistema de drenaje alcanzar una circulación mínima de agua en las operaciones que se realizan en interior mina. Esto con el fin de aprovechar toda el agua posible que sea reutilizable y desechar de forma eficiente el agua que no pueda ser tratada adecuadamente para evitar la contaminación. Se satisface los objetivos mediante la correcta elección del método de drenaje que se contempla al inicio del proyecto en concordancia con las características que posee cada mina. En tal sentido, los resultados tienen una utilidad metodológica para establecer un modelado matemático de las aguas residuales producto de la actividad minera en donde se hace sostenimiento con "*shotcrete*" y que se infiltran en estos acuíferos, para los fines de la gestión medioambiental, específicamente del agua.

La gestión medioambiental del agua, guarda relación con el cumplimiento de los objetivos prioritarios que fijó la Nueva Política Nacional del Ambiente al 2030, siendo un total de nueve (09) objetivos cuyos fines tienen prioridades ambientales y abarcan la incorporación de nuevas tendencias a fin de hacerle frente al problema público determinado por la nueva PNA al 2030 como la "Disminución de los bienes y servicios ecosistémicos" cuyas consecuencias afectan la sostenibilidad ambiental y el desarrollo de la población repercutiendo de forma directa o indirecta sobre su bienestar.

En cuanto a los servicios ecosistémicos, estos se definen como aquellos servicios que son provenientes de los ecosistemas y proveen beneficios económicos, sociales, culturales y ambientales a la población; en otras palabras, el ser humano depende directamente de dichos servicios. Sin embargo, hoy en día es lamentable presenciar cómo las acciones antrópicas influyen directamente en la degradación progresiva de los servicios ecosistémicos por la falta de conciencia ambiental y promover su uso de forma no sostenible en cuanto a criterios ambientales, sobre la naturaleza y los recursos que provee. En este sentido, Rojas et al. (2014), afirman lo siguiente:

> Las interacciones entre los componentes bióticos y abióticos de suelo y subsuelo proveen diferentes servicios ecosistémicos para el bienestar de la sociedad. No obstante, el desarrollo de actividades mineras ignora la estructura ecológica como herramienta para la planificación territorial, llevando a conflictos socioambientales que ponen de manifiesto la necesidad de establecer acciones de gestión a partir de las sinergias entre políticas y normas intersectoriales que permitan la armonización de instrumentos de gestión territorial, procurando la conservación, la restauración, el conocimiento, el uso sostenible y la gestión del riesgo de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Por tanto, uno de los objetivos prioritarios que se involucra directamente como la gestión medioambiental del agua es el OP 3 "Reducir la contaminación del aire, agua y suelo". Éste busca lograr frenar el deterioro y la mala gestión de recursos valiosos como el hídrico, el cual es originado por su uso insostenible en actividades cuyos fines son de ámbito productivo en el país y se ve afectado, en este caso, por la contaminación de los

componentes químicos que se infiltran sobre éste al momento de realizar la operación unitaria denominada como sostenimiento con *shotcrete*.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar el modelo matemático para la nueva composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados a partir del lanzamiento de "*shotcrete*" en la minería subterránea.

1.4.2. Objetivos específicos

a) Determinar la nueva composición química en mg/l que comprende a los parámetros fisicoquímicos del agua residual (conductividad, la dureza, el total de sólidos disueltos - TDS y el pH) con añadido de "*shotcrete*" en un medio acuoso de las unidades mineras subterráneas bajo condiciones laboratoriales.
b) Identificar los productos que se generan a partir de la reacción de los compuestos químicos en mg/l que comprende a los parámetros fisicoquímicos del agua residual (conductividad, la dureza, el total de sólidos disueltos - TDS y el pH) con añadido de "*shotcrete*" en un medio acuoso de las unidades mineras subterráneas bajo condiciones laboratoriales.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

El modelo matemático de la nueva composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados a partir del lanzamiento de *shotcrete* en unidades mineras subterráneas está determinada por los aditivos, cemento, variaciones en el pH, grado de turbidez y reacciones químicas del agua residual.

1.5.2. Hipótesis específicas

a) La combinación química que se genera a partir de los aditivos y cemento de las aguas residuales, recreados en un laboratorio químico certificado, es nociva para la calidad de agua que se infiltra en los acuíferos confinados.
b) A partir de un modelo matemático se determinan los productos que se generan al producirse las reacciones de los compuestos químicos, aditivos y cemento en las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados.

1.6. Variables

1.6.1. Identificación de las variables

Variable independiente: Lanzamiento de *shotcrete* en unidades mineras subterráneas de la sierra central.

Una variable independiente es definida como aquella cuyo valor no se ve afectado y no varía conforme avanza el proceso de la experimentación; estadísticamente, esta variable representa razones potenciales de variación.

Por tanto, en esta investigación se ha considerado el lanzamiento de *shotcrete* en 5 unidades mineras subterráneas ubicadas en la sierra central del país como variable independiente, lo cual permitió manipular y/o tratar dicha información en laboratorio con la finalidad de obtener un evento esperado y sujeto a cambios denominado como efecto.

Variable dependiente: Nueva composición de las aguas residuales en los acuíferos.

Las variables de este tipo expresan sus resultados en base a las modificaciones o datos de la variable independiente, por ende, al tratarse de la composición química resultante de los acuíferos dependerá de las características típicas del agua residual de cada unidad minera estudiada, el cual variará de acuerdo a cada caso.

1.6.2. Caracterización de las variables

La tabla de operacionalización de variables presenta cómo se ha estructurado el análisis de las variables para su estudio y el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN

Variables	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad/ Categorías	Escala de medición
Lanzamiento de *shotcrete* en minería subterránea	Técnica de sostenimiento que consiste en proyectar una mezcla de concreto neumáticamente sobre las superficies de las excavaciones mineras. Esta mezcla, compuesta por cemento, agregados, agua y aditivos, una vez aplicada, forma un soporte estructural adicional a los túneles y galerías. Como resultado del endurecimiento del *shotcrete* se produce agua residual.	Cantidad de *shotcrete* utilizado	Volumen de *shotcrete*	m3	Unidades
		Composición Química del *shotcrete*	Presencia de sólidos, metales, características físico-químicas, metales.	NTU, micras, escala Ph, mg/L	Intervalar
		Frecuencia de aplicación de *shotcrete*.	Aplicaciones de *shotcrete* por día	Aplicaciones/Día	Unidades
Nueva composición química del agua residual en los acuíferos	Conjunto de elementos y compuestos químicos presentes en el agua que ha sido afectada por las actividades de lanzamiento de *shotcrete* y se ha infiltrado en los acuíferos subterráneos.	Propiedades físicas del agua	Conductividad eléctrica	µS/cm	Unidades
			Turbidez	NTU	Unidades
		Propiedades químicas del agua	pH del agua	Escala Ph	Intervalar
			Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	Intervalar
			Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L	Intervalar
		Concentración de contaminantes	Concentración de sólidos disueltos totales	mg/L	Intervalar
			Concentración de sulfatos	mg/L	Intervalar
			Concentración de metales pesados	mg/L	Intervalar
			Concentración de nitratos	mg/L	Intervalar

1.6.3. Definición Operacional de las variables

- **Variable independiente:** El lanzamiento de *shotcrete* en minería subterránea se define como el proceso mediante el cual se aplica una mezcla de concreto proyectado (*shotcrete*) en las paredes y techos de túneles y otras estructuras subterráneas, utilizando equipos especializados para asegurar la estabilización y soporte del entorno minero. Este proceso incluye la gestión y caracterización de las aguas residuales generadas, propiedades físico-químicas y la presencia de sólidos y metales, así como concentraciones máximas de posibles vertidos que afectar fuentes de agua subterránea.
- **Variable dependiente:** La nueva composición química del agua residual en los acuíferos se define como el conjunto de propiedades físicas y químicas del agua subterránea que ha sido influenciada o no por la infiltración de aguas residuales generadas durante el proceso de lanzamiento de *shotcrete* en minería subterránea. Incluye la evaluación de las propiedades físicas del agua, propiedades químicas, y la concentración de contaminantes específicos introducidos por dichas aguas residuales; y representa la aproximación del tipo de calidad del agua de los acuíferos subterráneos a partir de la conductividad, la dureza, el total de sólidos disueltos – TDS, pH y las reacciones químicas que se generan en dicho proceso productivo.

1.7. Limitaciones de la investigación:

La limitación del presente proyecto se establece a partir de la nueva composición química del agua que se infiltra en los acuíferos confinados que se desplazan por toda la franja cordilleral de nuestro país. Principalmente en la sierra central, en donde se ubican la mayor cantidad de unidades mineras de explotación subterránea que en la actualidad operan en el país. Todo ello con el fin de establecer un parámetro de contaminación de los efluentes que no ingresan al sistema de bombeo luego del ciclo de minado, ya que se infiltran directamente en la roca caja piso en porcentajes no significativos en volumen, pero sí muy recurrentes en el tiempo ya que no son canalizados en las cunetas. Por lo

tanto, el presente trabajo sólo abarca la franja central de la cordillera de nuestro país, discriminando la cordillera sur y norte del Perú.

A continuación, se presenta en la Figura 2 un gráfico de la ubicación geográfica de las 5 unidades mineras de producción correspondientes a la Sierra Central del Perú.

Figura 2

Ubicación geográfica de las 5 unidades mineras de producción en la sierra central del Perú

1.8. Descripción de las características de la investigación

- **Tipo de estudio:** Es de tipo es Aplicado ya que en la presente investigación el problema está plenamente establecido y es conocido por el autor, por lo que se utiliza la investigación para dar respuesta a preguntas específicas tales como

conocer la nueva composición química y los resultados de los productos que se generan a partir de la reacción de los compuestos químicos en las aguas que se infiltran en los acuíferos confinados. Este tipo de investigación se abastece por el tipo básico o puro, ya que mediante la teoría se encarga de resolver problemas prácticos basados en los hallazgos, descubrimientos y soluciones planteadas en el objetivo del estudio (Arias, 2020).

- **Nivel de Investigación:** Es de nivel Predictivo ya que para poder definir el comportamiento en su estructura química del agua que se infiltran en los acuíferos confinados que se encuentran por debajo de las unidades mineras subterráneas ubicadas en la sierra central del país. Consiste en prever situaciones futuras, a partir de estudios exhaustivos de la evolución dinámica de los eventos, de su interrelación con el contexto, de las fuerzas volitivas de los actores que intervienen, y del estudio de las probabilidades de que algunos de estos eventos pudieran presentarse (Whitney, 1970).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

La nueva minería en México está centrada en los metales industriales y preciosos, se realiza a gran escala y principalmente a cielo abierto (Armendáriz, 2016), la misma que produce impactos ambientales notorios, destacando contaminación de ríos y acuíferos con metales pesados y otras sustancias, drenaje ácido, remoción de la cubierta vegetal, generación de altas cantidades de escombros contaminantes, abatimiento de fuentes de agua, emisiones continuas de gases y polvos a la atmósfera durante la extracción y procesamiento. Sin embargo, en la mayoría de los casos debido a la oxidación de sulfuros, ampliamente representados en la zona de estudio. Sin embargo, la conclusión más relevante a la que se ha llegado es que no se observan, ni en las aguas superficiales ni en las aguas subterráneas muestreadas, contenidos anormalmente elevados de metales pesados a causa de la alteración inducida por las actividades mineras (De La Losa, 2010).

En el aspecto preventivo las diferentes instituciones tanto gubernamentales y no gubernamentales a nivel global han comenzado a tomar acción en la prevención en este foco de contaminación que se traduce en la contaminación de aguas subterráneas por LNAPLs (Light Liquids in Non Aqueous Phase - Líquidos Ligeros en Fase no Acuosa), también es uno de los problemas medioambientales más importantes que aquejan a la industria de los hidrocarburos. Los LNAPLs afectan la calidad de las aguas subterráneas en muchos lugares del mundo, donde el más común de los problemas es la liberación de productos derivados del petróleo hacia las napas de agua (Larenas, 2009), pero todo ello puede correr el riesgo de ser las medidas que no atacan directamente el problema, por lo tanto, la solución puede estar también muy lejos de ser la adecuada.

Un efecto más sutil del agua subterránea sobre las propiedades mecánicas de las rocas puede surgir de la acción nociva del agua en determinadas rocas y minerales. Por ejemplo, la arcilla se muestra suave en presencia de agua, reduciendo el esfuerzo y

aumentando la deformabilidad del macizo rocoso (Meza, 2015), avalando lo establecido en el párrafo anterior.

Previo al tratamiento de metales se propone un tratamiento inicial del agua superficial. Este tratamiento consta de un pretratamiento con un sistema de rejas y un tratamiento primario basado en sedimentación primaria, filtración en lecho ascendente y aireación en cascada (Hernandez, 2014), esto debe complementar la acción del bombeo y desagüe de minas, se producen variaciones de los niveles freáticos, y cambios localizados en el caudal de los manantiales y en la dirección del flujo; mientras que por acción de la lixiviación de sulfuros se producen alteraciones en la calidad del agua (aguas ácidas), (Tovar, 2005).

2.2. Definición de términos

Hidrogeología

Es la "ciencia que se enfoca al ciclo hidrológico global y a los procesos involucrados en la parte continental de dicho ciclo, es decir, es la geociencia que describe y predice las variaciones espaciales y temporales del agua en las etapas terrestre, oceánica y atmosférica del sistema hídrico global y; el movimiento del agua sobre y debajo de la superficie terrestre, incluyendo los procesos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar a lo largo de su trayectoria" (Breña & Jacobo, 2006).

Modelamiento matemático

Un modelo matemático es una representación simplificada, a través de ecuaciones, funciones o fórmulas matemáticas, de un fenómeno o de la relación entre dos o más variables. La rama de las matemáticas que se encarga de estudiar las cualidades y estructura de los modelos es la llamada "teoría de los modelos" (Roldán, 2011; Belghit & Benyaich, 2014).

Aguas residuales mineras (efluente industrial)

Residuos provenientes de la industria; pueden ser clasificados ampliamente de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas, por su comportamiento en las aguas receptoras y en la forma como éstos afectan el medio ambiente acuático, generalmente contienen sustancias orgánicas disueltas que incluyen tóxicos, materiales biodegradables y persistentes, sustancias inorgánicas disueltas que incluyen nutrientes, sustancias orgánicas insolubles y solubles (Ingeominas, 2003).

Acuíferos confinados

Es aquel que, en su límite superior o techo, el agua está a una presión superior a la atmosférica. Se comportan así los materiales permeables que están cubiertos por una capa confinante mucho menos permeable (por ejemplo, una capa arenosa bajo otra arcillosa (Minera Buenaventura unidad Orcopampa, 1990). Es una formación geológica porosa que contiene agua en saturación completa, lo que significa que todo el espacio vacío interconectado está lleno de agua. Además, permite la movilidad del agua a través de ella bajo condiciones normales de campo. La clasificación de una formación geológica como acuífero depende de su capacidad para almacenar y transmitir agua en comparación con otras formaciones cercanas. Otros términos relacionados incluyen reservorio de aguas subterráneas y zona o formación acuífera (Bear & Cheng, 2010).

Concreto lanzado ("*shotcrete*")

Es un material de construcción de cemento, agua, y áridos igual que hormigón convencional. La única diferencia consiste en la forma de compactación. Un hormigón que es compactado por la energía de proyección como hormigón de proyección en el momento de incidir sobre las paredes debe tener, por lo menos teóricamente, las mismas características que el hormigón de construcción vibrado (Tapia, 2008).

2.3. Bases Teóricas

La demanda por los recursos minerales es cada vez mayor, a pesar de que muchos de ellos se encuentran en yacimientos cada vez más pobres. La alta cotización de los

metales en mercados en años recientes en el mercado internacional, principalmente de oro y plata, así como la implementación de nuevas tecnologías, promueve el interés de compañías transnacionales en áreas que, aunque no tengan una elevada concentración de minerales como en el pasado, pueden resultar altamente redituables (Hernandez, 2014).

Para una mejor comprensión del papel que desempeñan las actividades mineras como posibles inductoras de contaminación de las aguas subterráneas (y de las superficiales), será conveniente, en primer lugar, pasar rápida revista a los principales métodos de explotación minera, ya que en cierto modo son determinantes en tales procesos de contaminación. A grandes rasgos, la minería se clasifica en sistemas de explotación subterránea y a cielo abierto, si bien hay otros métodos específicos la disolución, la lixiviación o la combustión «in situ» que convendrá tener en cuenta (Fernández, 2002).

En lo que respecta al sostenimiento en el ciclo de minado de la minería subterránea; uno de los más importantes y costosos es el concreto lanzado o también llamado *shotcrete*. Como primer elemento de sostenimiento, el *shotcrete* determina, en gran medida, el tiempo del ciclo de minado. El principal objetivo es reducir el tiempo de fraguado, conservando las propiedades iniciales de resistencia antes de proceder a colocar el segundo y permanente elemento de sostenimiento; que por lo general son los pernos de anclaje. El concreto lanzado normalmente incorpora aditivos y pueden incluir también adiciones de fibras (metálicas o sintéticas) o una combinación de éstas. Ambos términos, concreto lanzado o *shotcrete*, se refieren básicamente al mismo material. La tendencia, especialmente en Europa, es referirse al producto como concreto lanzado. En nuestro medio usamos preferentemente la terminología americana de *shotcrete*. Los principios aplicados a la tecnología del concreto no son diferentes en el *"shotcrete"*. Esto significa que el *shotcrete* debería ser diseñado aplicando los desarrollos y recursos de la tecnología del concreto para lograr una mezcla con costos efectivos y optimizados (Vinatea, 2012).

Existen trabajos que presentan las características más relevantes del modelo matemático como por ejemplo del acuífero Almonte-Marismas actualizado, centrándose en las mejoras y modificaciones con respecto a versiones anteriores del modelo. Así

mismo, se incluyen dos estudios sobre las aplicaciones del modelo: análisis de impacto bajo distintos escenarios climáticos y evaluación de los efectos causados por una actuación concreta para mejorar el abastecimiento urbano (Guardiola, 2009); por lo tanto, el modelo matemático, así como las alternativas simuladas sobre el mismo, constituyen una herramienta práctica de apoyo a la gestión de los recursos hídricos de Marina Baja de Alicante cuyo patrón se puede aplicar a cualquier otro sistema de explotación (Roldán, 2011).

Para elaborar un modelo efectivo se sigue un proceso estructurado. El primer paso implica identificar la información necesaria luego, se desarrolla un modelo conceptual simplificado que abstrae la realidad mediante suposiciones fundamentadas sobre el sistema en estudio, como la hidrogeología o la estratigrafía del dominio. El tercer paso es la formulación de un modelo matemático que traduce el modelo conceptual en ecuaciones que describen balances de cantidades extensivas, condiciones iniciales y de contorno, y las interacciones del sistema con su entorno. Finalmente, este modelo matemático se convierte en un modelo numérico resuelto para prever el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones (Bear & Cheng, 2010).

A su vez la minería está asociada con problemas de drenaje de aguas residuales que pueden influenciar en el largo plazo a los cuerpos de agua. Los efluentes generados en la industria minera por el lanzado de *shotcrete* contienen grandes cantidades de aguas residuales con presencia de metales, lo que puede tener graves implicaciones para la salud humana y el ecosistema. La infiltración de aguas residuales, no solo se origina en el lanzamiento de *shotcrete* para el sostenimiento, sino que también se origina en rocas de desmonte, mineral y estructuras mineras, siendo su intensidad una función de la mineralogía local, la disponibilidad de agua y oxígeno (Zheng & Bennet, 2022).

No obstante, las aguas residuales producto de la minería pueden contaminar tanto las aguas superficiales como subterráneas y los suelos. Dado que estos factores son altamente variables, predecir el potencial contaminante total de las aguas residuales de minas puede ser extremadamente desafiante y costoso. Cada mina es única en términos

de su potencial contaminante, lo que significa que el riesgo asociado y las opciones de mitigación varían de un sitio a otro (Akcil & Koldas, 2006).

Por tanto, las estrategias de gestión de calidad de las aguas son procesos que suelen ser largos y que se producen como resultado de presiones sociales y mediáticas. Hasta la fecha, las estrategias de conservación de la calidad (al momento de ser formuladas) se han centrado en la protección de la captación de agua, mediante perímetros de protección que se determinan mediante el área de captura, el tiempo de tránsito, comportamiento hidráulico del acuífero o la distancia de la fuente de contaminación (Sharma y Reddy, 2004). Otras líneas de actuación más amplias se dirigen al acuífero, estableciendo una cartografía de vulnerabilidad a la contaminación y de redes de control, mediante pozos y piezómetros de observación y muestreo, en correspondencia a la importancia social y económica del recurso (López, 2002).

Teniendo en cuenta las diversas teorías, es necesario tener la información tanto de la Geología Local, Descripción Litológica, Parámetros Geológicos, así como también de la caracterización del agua subterránea, así como de la dosificación de *shotcrete* por cada unidad minera para continuar con la investigación, por tal motivo se considera la siguiente información.

2.3.1. Geología Local

Determinar la geología local de una específica zona de estudio comprende la descripción del sustrato o roca base que da origen a la formación de unidades geomorfológicas; asimismo, se detallarán las características propias del terreno en base a la recopilación de datos como resultado de una evaluación geológica en las áreas de influencia (en este caso, U. M. Carahuacra, U. M. San Cristóbal, U. M. Andaychagua, U. M. El Porvenir y U. M. Atacocha) incluyendo, además, información sobre la litoestratigrafía, geología estructural, presencia de depósitos cuaternarios, entre otros.

La geología local comprende básicamente la litología y geología de un lugar particular. En ella se representan las unidades litológicas, estructura y petrología. (...) se

refiere a un lugar particular y la estructura es la arquitectura o distribución de los materiales afectados por tectonismo (Valenzuela & Buendía, 2020).

Dentro de este estudio, las diferentes formaciones rocosas que se presentan son conocidas como unidades estratigráficas, las cuales han dado origen y se relacionan con la mineralización, asimismo, son identificadas por sus propiedades litológicas y características de composición química y mineralógica medianamente homogéneas y con contactos geológicos definidos.

La geomorfología considera los procesos de erosión y sedimentación causados por los diversos agentes meteorológicos, tectónicos, volcánicos, antrópicos, etc., que se encuentran en actividad y siguen actuando sobre el relieve terrestre (…) (Merino, 2022).

En la Unidad Minera Carahuacra, los estudios geológicos dentro del área de estudio señalan que, entre las unidades litológicas que afloran en la superficie terrestre, se encuentra el Grupo Excélsior (afloramiento en la zona central y oeste) compuesto principalmente por filitas (bajo grado de fracturamiento en superficie) y venillas de cuarzo, pirita y material arcilloso compacto, asimismo, presenta poca oxidación y se observa la presencia de tramos cuyo grado de fracturamiento es alto; Grupo Mitu, que presenta zonas de moderado (con presencia de venillas, cavidades mineralizadas con sulfuros, óxidos) a bajo (andesita con una textura brechada) grado de fracturamiento y se observan, además, venillas de calcita, venillas mineralizadas con sulfuros y algunos niveles arcillosos con poca presencia de óxidos; Grupo Pucará, con fracturamiento de moderado (en zonas rellenadas con venillas de calcita y escasa oxidación) a alto (zonas con presencia de alteración hidrotermal o argilización) y la calcita alterna ocasionalmente con unidades de lutitas, margas y areniscas calcáreas; Grupo Goyllarisquizga, que presenta un grado de fracturamiento moderado en su mayoría con presencia de grano fino y sulfuros diseminados con venillas de sílice en las fracturas, se compone de areniscas cuarcíticas con intercalación de lutitas y limolitas rojizas en la base y con areniscas calcáreas y lutitas grises en la parte superior.

En adición a ello, presenta una Unidad meta volcánica, que es una secuencia de transiciones volcánicas entre el Grupo Excelsior y el Grupo Mitu que han sufrido metamorfismo de bajo grado y poseen una textura brechosa, presentan débil a moderado fracturamiento con presencia de venillas de calcita y ligera mineralización de sulfuros. Por último, se encuentran rocas intrusivas como microdioritas (con textura fanerítica verde parduzco) y tonalitas, que se encuentran poco a moderadamente fracturadas con venas de calcitas, venillas de sílice y óxidos de hierro.

En la Unidad Minera San Cristóbal, las unidades litológicas se componen principalmente de filitas con un bajo grado de fracturamiento en superficie y presenta venillas de cuarzo, de pirita y material arcilloso compacto, asimismo, presenta poca oxidación y existen tramos con alto grado de fracturamiento. En cuanto a los Meta-Volcánicos (secuencia transitiva entre el Grupo Excélsior y el Grupo Mitu) presentan un bajo grado de metamorfismo, textura brechosa, débil a moderado fracturamiento y, asimismo, se observan venillas de calcita y una ligera mineralización de sulfuros.

Las filitas son rocas metamórficas de grano fino que se forman cuando una roca sedimentaria de grano fino (como lutitas o mudstone) son enterradas y sometidas a temperaturas y presiones relativamente bajas por un periodo largo; estas rocas muestran una foliación de grado intermedio, es decir, que tienen tendencia a dividirse en láminas o placas debido al alineamiento paralelo de mica.

Tal como el caso anterior, en la Unidad Minera Andaychagua las filitas (en este caso, del Grupo Excélsior y meta volcánicos del Grupo Mitú) predominan en toda el área de estudio, el cual comprende 5 zonas: La zona del Cuerpo Prosperidad Techo y zona Prosperidad 1 (por el este), zona Salvadora (sureste), zona Andaychagua (oeste y área central) y la zona de la Veta Andaychagua 1 (este). Las filitas también se encuentran a modo de franjas con diferentes dimensiones y formas en el corredor meta volcánico que se encuentra al NE (que alberga a la Veta Andaychagua y la Veta Andaychagua 1); asimismo, se evidencian alteraciones como silicificación, argilización, cloritización y sericitización.

Al extremo NE del área de estudio, se observa un corredor meta volcánico con orientación NW-SE de 80m promedio de ancho dentro de las filitas (alberga a los Cuerpos Techo y Prosperidad 1), el cual está fraccionado en una parte NW y una parte SE por la falla-veta Andaychagua y que está limitado lateralmente por el W y E por filitas foliadas y en tramos sericitizados. Por lo general, los metavolcánicos muestran un grado de argilización de ligero a moderado. En cuanto al Cuerpo Salvadora, ubicada al sureste del yacimiento, se hospeda en los horizontes meta volcánicos de rumbo general NW-SE y como roca hospedante se tiene a las filitas del Grupo Excélsior.

En cuanto a la Unidad Minera El Porvenir, el área de estudio presenta sistemas de fallas de triásico superior como consecuencia de una tectónica distensiva, presentándose, por el Este, la falla Milpo-Atacocha. Ésta es la que constituye la estructura de mayor importancia del distrito con un rumbo N-S y se extiende desde Yarusyacan (por el norte) hasta la hondonada Carmen Chico (por el sur). El emplazamiento de los intrusivos hipoabisales en el distrito están controlados y asociados por la formación de fallas Milpo-Atacocha y, en consecuencia, también las diferentes etapas del proceso de mineralización.

Por lo tanto, la secuencia estratigráfica correspondiente a la zona de estudio se presenta completa desde la base del Grupo Pucará hasta la formación Pocobamba con un rumbo general N-S y fuerte inclinación hacia el este (70°-85°) para el Grupo Pucará, que va haciéndose progresivamente menor (30°-40°) al pasar de la Formación Goyllarisquizga hacia la Formación Pocobamba, en esta zona se puede encontrar sills basálticos siguiendo la estratificación. Asimismo, se presume que los cuerpos intrusivos relacionados a mineralización en El Porvenir (Stock Milpo) se han visto favorecidos para su emplazamiento en zonas alineadas con el sistema de fallas NO-SE.

Por último, en la Unidad Minera Atacocha se evidencian tres estructuras predominantes en el Yacimiento Milpo ordenados en orden cronológico, éstas son: El Sinclinal Milpo (Atacocha), La Falla Regional Milpo (Atacocha) y Fracturamiento. Los sedimentos del yacimiento fueron intensamente comprimidos de Este a Oeste en la segunda fase de la Orogenia Andina (plegamiento incaico), ocurrida entre el Eoceno y el Oligoceno, por lo que las Calizas Pucará yacen verticalmente en el centro y a todo el largo

del eje y la Formación Goyllarisquizga, gradualmente buzando menos hacia los flancos. Por el Oeste de Milpo, dichas areniscas buzan 50°NO, pero en el Sur están curvadas hacia arriba de la posición vertical con los topes escurridos hacia el Oeste. Varios ejes de pliegues se han localizado en este sinclinal que tiene relación con la mineralización.

La Falla Milpo-Atacocha constituye la estructura de mayor importancia del distrito, con rumbo NS y se extiende desde Yarusyacán en el Norte hasta la Hondonada Carmen Chico en el Sur. El emplazamiento de los intrusivos hipoabisales en el distrito están controlados y asociados por el Fallamiento Milpo-Atacocha y, en consecuencia, también las diferentes etapas del proceso mineralizante. El fracturamiento se originó en tres períodos: El primero se relaciona con el plegamiento regional NS y con la Falla Milpo-Atacocha; el segundo, desarrolla fracturas de rumbo NE directamente relacionadas con la etapa de plegamiento de los stocks, origen de los diques, fracturas en calizas de las Vetas San Carlos, Porvenir 9 y, además, fracturas cortas de rumbo N 70° E en los cuerpos mineralizados; por último, el tercer periodo desarrolla fracturas de rumbo N35°O y N65°O de pequeñas longitudes también relacionadas en los cuerpos mineralizados.

2.3.2. Descripción Litológica

La forma en la que describe la litología se centra en las características físicas y químicas que poseen las rocas dentro de un área determinada; para Pedrinaci et al. (2013), los procesos geológicos internos y externos cambian las condiciones físico-químicas en las que se encuentran los materiales terrestres favoreciendo su transformación a lo largo del tiempo geológico. Estos cambios pueden ser pequeños o grandes, continuos o episódicos, y graduales o catastróficos. Los procesos geológicos pueden sucederse en el tiempo afectando de forma cíclica a un mismo material geológico. Las rocas y sedimentos de la superficie terrestre, por efecto de la subsidencia y la tectónica, pueden alcanzar grandes profundidades incrementándose la temperatura y la presión que soportan. Así mismo, las rocas de zonas profundas de la corteza terrestre y del manto pueden llegar a alcanzar la superficie terrestre.

Siendo estas características dependientes de la naturaleza que tienen y la causa del comportamiento que adoptan ante fenómenos naturales y agentes de relieve, así mismo

es la forma en la que se pueden clasificar por determinados parámetros que puedan llegar a tener en común las rocas que componen una determinada área o también llamadas unidades litológicas, estas unidades se definen como un cuerpo rocoso que ha sido clasificado según sus características litológicas y estratigráficas, teniendo en cuenta, además, la composición mineralógica y los límites con otras unidades.

Según Sánchez y León (2000), se señalan que una clasificación estratigráfica consiste en organizar sistemáticamente los estratos de la Tierra en unidades que representan las principales variaciones del carácter litológico de las rocas. Todas las unidades estratigráficas están compuestas de rocas, por tanto, poseen "carácter rocoso" pero solo las unidades litoestratigráficas se diferencian en base a la clase de rocas que las componen. Una mala aplicación de los criterios de clasificación solo conlleva a la informalidad en la descripción de las unidades de una región o territorio, y a una inadecuada correlación estratigráfica a escala regional.

La Mina Carahuacra posee como parte de su litología en la parte central y oeste filitas Excelsior, en zonas de moderado a bajo fracturamiento de volcánicos andesíticos y en medio de las zonas anteriores una secuencia de transición de metavolcánicos, además en zonas de diferentes grados de fracturamiento Calizas Pucara. Esta forma litológica se asemeja en las siguientes 2 unidades mineras con la presencia de ciertos grupos.

En la masa rocosa de la Mina San Cristóbal se presenta una litología de roca volcánica (cuarzo monzonitas, monzonitas) y filitas (Bituminosas propiliticas, silicificadas y argeliticas) compuesta por cuarzo, sericita, mica y clorito con presencia de alteración de silicificación, hacia la parte Oeste de la Veta 658 yace el volcánico Mitu y las Calizas Pucará, en cuanto al resto de la veta, la Veta Split 758 y la Veta 722 se encuentran dentro de las filitas Excelsior.

Para la Mina Andaychagua comparte la presencia de roca filita intercalada con metavolcánica presentes en la caja techo y piso entre los Niveles 1250 a 1275, en cuanto a las zonas Prosperidad Techo, Prosperidad I y Salvadora se encuentran emplazadas en

rocas metavolcánicas y filitas, así como para Andaychagua I una caja piso con diseminado metavolcánico y roca metavolcánica en la caja techo.

En comparación con la litología de las anteriores unidades Mineras mencionadas, la Mina El Porvenir predomina en su masa rocosa la limolita con intercalaciones dentro de la arenisca con mayoría en la caja piso, además de arenisca en la roca primaria y donde se emplaza el mineral, posee fallas continuas y zonas de alto grado de alteración.

Por último, existe la presencia de limolitas y arenisca en ciertas áreas de la Mina Atacocha más se encuentran en diferentes unidades como basalto, intrusivos, brecha silícea y Brecha Hidrotermal, además de un grupo Pucara conformado por calizas (beige, grises a gris oscuras, mítricas), micritas a esparíticas con niveles de dolomías finas, calcarenitas, volcánicos finos verdosos, dolomicritas (gris oscuros a negras) horizontes chérticos, fosilíferos y bituminosos, más lutitas negras.

En resumen, la Mina Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua comparte parte de sus características litológicas principalmente en el grupo de filitas y metavolcánicos, más la Mina El Porvenir y Atacocha muestran similitud con la presencia de limolitas y areniscas, explicando de tal manera la semejanza debido a la cercanía entre las unidades.

2.3.3. Parámetros Geológicos

La formación geológica determina la presencia de materiales duros o de baja resistencia y las discontinuidades pueden facilitar la ocurrencia de movimientos a lo largo de ciertos planos de debilidad según Diaz (2016) y Vidal (2015).

Los factores geológicos que dominan el comportamiento y las propiedades mecánicas de los macizos rocosos son (González, 2002):

- La litología y propiedades de la matriz rocosa.
- La estructura geológica y las discontinuidades.
- El estado de esfuerzos a que está sometido el material.
- El grado de alteración o meteorización.

- Las condiciones hidrogeológicas.

Parámetros geomecánicos de la masa rocosa

Para la clasificación de la masa rocosa, se optó por emplear el criterio de Bieniawski de 1989, más conocido como la clasificación Rock Mass Rating (RMR) o Valoración de la Masa Rocosa, para Celada et al. (2014) define esta clasificación como:

El sistema Rock Mass Rating (RMR) fue presentado hace 40 años por el Profesor Bieniawski (1973), y actualizado en 1989. Desde entonces se ha convertido en una referencia mundial para clasificar los macizos rocosos, establecer sus propiedades tenso-deformacionales y estimar empíricamente el sostenimiento de las excavaciones subterráneas. El RMR clasifica los macizos rocosos de 0 a 100 puntos, valorando cinco parámetros.

Adicionalmente, según Tomas et al. (2004), el índice básico (RMR básico) establece una serie de correcciones en función del paralelismo discontinuidad-talud, el buzamiento de las discontinuidades, el buzamiento relativo y el método de excavación empleado. Por lo que siguiendo esta clasificación se toma en cuenta el siguiente criterio presente en la Tabla 1.

Tabla 1

Tabla de clasificación geomecánica RMR

Tipo de roca	Rango RMR	Rango Q	Calidad según RMR	Color
II	61 - 100	>5,92	Buena	
IIIA	51 - 60	1,95 – 5,92	Regular A	
IIIA	41 - 50	0,64 – 1,95	Regular B	
IVA	41 - 50	0,21 - 0,64	Mala A	
IVB	21 - 30	0,08 - 0,21	Mala B	
V	0 - 20	<0,08	Muy Mala	

Nota. Elaboración propia.

a) Unidad Minera Carahuacra

A continuación, en la Tabla 2 se aprecia la orientación de las secciones empleadas por estructura correspondiente a la Unidad Minera Carahuacra.

Tabla 2

Orientación de las secciones empleadas por estructura correspondiente a la Unidad Minera Carahuacra

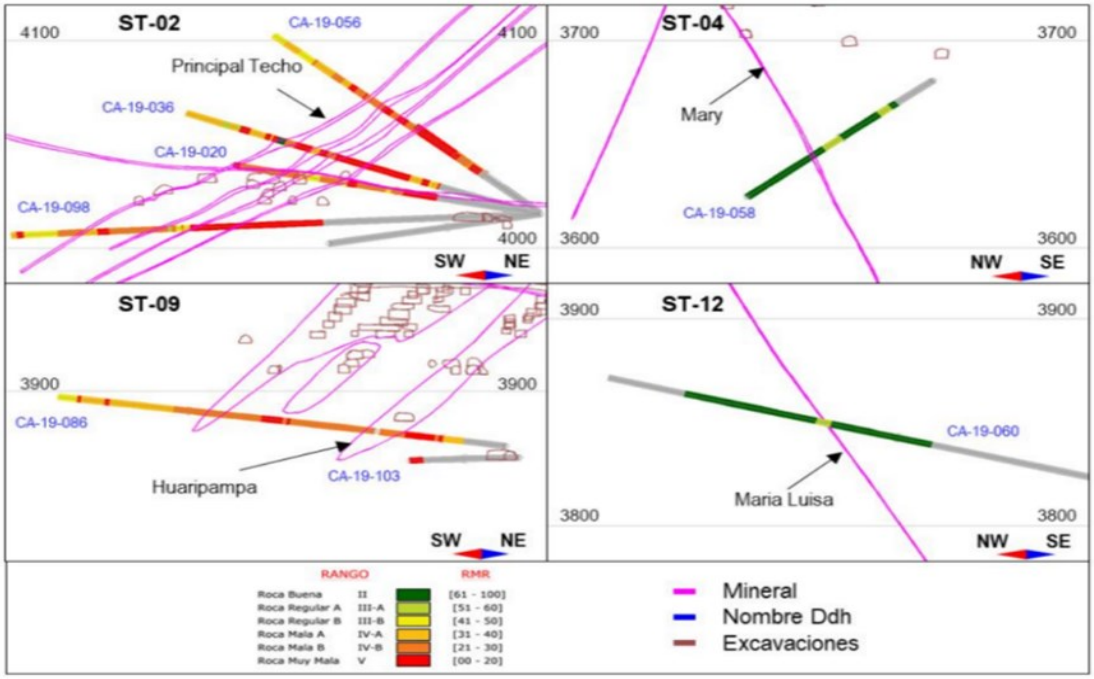
Estructura	Sección	Azimut	Dip	Vista
Principal Techo	ST-02 - ST-03	56	90	NW
Mary	ST-04 - ST-05 - ST-06	136	90	NE
Diana	ST-07	136	90	NE
Huaripampa	ST-08 - ST-09	52	90	NW
María Luisa	ST-10 - ST-11 - ST-12	132	90	NE
Galáctico	ST-13	58	90	NW
Paula Techo	ST-01	64	90	NW

Nota. Elaboración propia.

En cada una de las secciones correspondientes a Principal Techo, Huaripampa, María Luisa y Mary se han plasmado los resultados de la clasificación geomecánica RMR. Entonces, a modo de ejemplo, la Figura 3 muestra para cada estructura mencionada una sección transversal con el resultado de la clasificación geomecánica.

Figura 3

Clasificación RMR en secciones transversales por estructura



Nota. Elaboración propia.

Según lo observado en la Figura 3 y, añadido a ello, la información previa respecto a la calidad de la masa rocosa involucrada con el minado de las 4 estructuras mineralizadas mencionadas se puede diferir lo siguiente:

- **Manto Principal**

En el Techo Principal, la calidad de la masa rocosa es de Muy Mala (V) y varía hasta Regular B (IIIB), esto ocurre tanto en la zona mineralizada y la roca encajonante; mientras que, el tramo de Regular B ocurre de manera puntual.

- **Veta Mary**

Para la Veta Mary, la calidad de la masa rocosa varía entre Regular A (IIIA) hasta Buena (II) por lo que representa buenas condiciones geomecánicas para el minado; en este caso, la calidad del mineral es generalmente Regular A (IIIA).

- **Veta Diana**

En la Veta Diana, según el mapeo en las excavaciones subterráneas, se ha logrado ver que el mineral y cajas se hallan con calidad Mala A (IVA); mientras que, en la caja techo alejada la calidad es Regular B (IIIB). No se ha contado con información de testigos rocosos.

- **Cuerpo Huaripampa**

En el Cuerpo Huaripampa, la calidad de la masa rocosa también varía desde Muy Mala (V) pero llega solamente hasta Mala A (IVA); esta ocurrencia de calidad se manifiesta tanto en la zona mineralizada y en la roca encajonante.

- **Veta Paula Techo**

En el caso de la Veta Paula Techo, no se ha levantado información por no estar disponible durante la etapa de campo, asimismo, tampoco se contó con información de testigos rocosos.

b) Unidad Minera San Cristobal

En el caso de la Unidad Minera San Cristóbal, el comportamiento litológico en la caja techo de la masa rocosa de las Vetas 658, Split 658, 722 y Ramal Piso 722, se han estimado en función a la tendencia y frecuencia de estos con la tendencia de datos en los tramos de logueo. Asimismo, se evaluó la tendencia de los diversos parámetros geomecánicos del RMR y del Índice Q, los cuales sirvieron de base para los análisis posteriores en el modelamiento geomecánico, estimación de las aberturas máximas, y en la determinación de los métodos de explotación.

La litológicas de la masa rocosa que presenta la Mina San Cristóbal, está conformada por la presencia de roca volcánica (cuarzo monzonitas, monzonitas) y filitas (Bituminosas propiliticas, silicificadas y argeliticas). Al oeste de la Veta 658 se encuentra el volcánico Mitu, el tramo restante de esta veta, así como la Veta Split 758 y la Veta 722 se hallan ubicadas dentro de las filitas Excelsior.

En sectores de la zona de filitas presentan una alteración de silicificación. Hacia el extremo Oeste de la Veta 658 se observa el contacto entre el Volcánico Mitu y las Calizas Pucará, estando entre ellas el Intrusivo San Cristóbal hacia el lado Sur de la Veta 658.

El resultado del mapeado geomecánico de los sistemas de discontinuidades obtenidos para cada veta en la Tabla 3:

Tabla 3

Resultados del mapeado geo mecánico obtenido de los sistemas de discontinuidades por cada veta

Descripción	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Veta 658	N 220/50	N 335/70	N 150/80	N 70/60
Veta Split 658	N 210/60	N 340/80	N 160/80	N 120/70
Veta 722	N 220/54	N 340/80	N 160/80	N 90/60

Nota. Elaboración propia.

De los resultados individuales obtenidos para cada veta, se observa una tendencia similar bastante definida de los sistemas principales en las tres vetas, así como en el resultado compósito. A partir de ello se menciona lo siguiente:

1. Existen tres sistemas principales bien definidos. El Sistema 1 presenta rumbo NW y tiene moderado buzamiento al SW.
2. El Sistema 2 presenta rumbo NE y tiene alto buzamiento al NW.
3. El Sistema 3 tiene el mismo rumbo del Sistema 2 pero su buzamiento es contrario al mismo, teniendo alto buzamiento hacia el SE.
4. Los Sistemas 2 y 3 contribuyen a la generación de falsas cajas en las estructuras mineralizadas, estas se desprenden cuando se realiza la voladura de explotación de los taladros largos, sobre todo de la caja techo.

Detrás de estas capas la calidad del macizo rocoso mejora sustantivamente. Este hecho permite que los subniveles puedan mantenerse estables mientras dure el tiempo de preparación de estas labores hasta concluir la excavación del nivel principal.

c) Unidad Minera Andaychagua

Para determinar los parámetros de resistencia de la roca intacta; resistencia de las discontinuidades y la resistencia de la masa rocosa se ha tenido en cuenta la siguiente información:

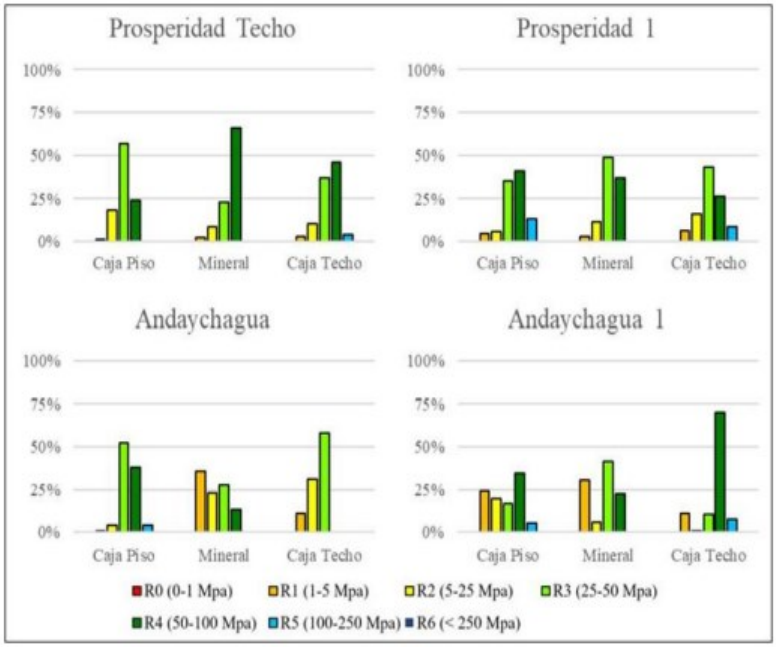
- Resultados de los ensayos de campo y laboratorio realizados para la presente evaluación.
- Resultados de los ensayos de campo y laboratorio realizados en estudios previos (SVS Ingenieros, 2014, DCR Ingenieros, 2010, DCR Ingenieros, 2019).

En todos los casos la información de mayor relevancia son los resultados de los ensayos actuales. Los ensayos previos han aportado información complementaria para la Zona de Andaychagua ya que las Zonas Prosperidad Techo; Prosperidad 1, Andaychagua 1 y Salvadora también han sido objeto de estudios previos.

Asimismo, uno de los parámetros más importantes del comportamiento mecánico de la masa rocosa, es la resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta ($^{\delta}$c) o denominada también UCS. Durante los trabajos de campo, como parte del logueo geotécnico de testigos de sondajes diamantinos, se estimó la UCS de los testigos rocosos mediante el martillo de geólogo para la determinación del RMR. La siguiente figura 4 muestra los resultados obtenidos en cada una de las zonas en estudio.

Figura 4

Resumen de resultados martillo de geólogo



Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, en campo también se realizaron ensayos de carga puntual. Se ejecutó un muestreo de bloques para cada una de las 5 zonas en estudio, sin embargo, solo se pudieron ensayar 5 bloques por inconvenientes con el equipo de carga puntual de Mina Andaychagua. En cada bloque se realizaron 15 roturas con la modalidad de bloque irregular siguiendo lo establecido en la norma ASTM D5731-02 como se muestra en la Tabla 4 y 5.

Tabla 4

Ensayos de campo - Ubicación de muestras para carga puntual

Muestra	Zona	Litología	Caja	Nivel	Labor
M-01	Andaychagua	Mineral	Mineral	Nv-1250	TJ-500
M-02	Andaychagua	Filita silisificada	Piso	Nv-1250	TJ-500
M-03	Andaychagua	Mineral	Mineral	Nv-1250	TJ-400
M-04	Andaychagua	Metavolcánico	Piso	Nv-1250	TJ-500
M-05	Andaychagua 1	Metavolcánico	Techo	Nv-1250	TJ-600

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5

Ensayos de campo - Resumen resultados carga puntual

Muestra	Litología	Número de roturas	Ix 50(MPa)			
			Min	Max	Media	S.D.
M-01	Mineral	15	0,3	3,0	1,5	0,9
M-02	Filita silisificada	15	1,1	6,7	4,1	1,7
M-03	Mineral	15	1,2	8,9	3,7	2,0
M-04	Metavolcánico	15	1,0	5,7	3,5	1,2
M-05	Metavolcánico	15	3,5	11,6	7,7	2,7

Nota. Elaboración propia.

Para la presente evaluación se han realizado ensayos de laboratorio. La Tabla 6 contiene la ubicación y litología de las muestras enviadas al laboratorio.

Tabla 6

Ensayos de laboratorio - Ubicación de muestras

Muestra	Zona	Litología	Nivel	Labor
M-01	Andaychagua	Filita Silicificada	Nv-1250	TJ-500
M-02	Andaychagua	Filita Foliada	Nv-1250	TJ-500
M-03	Prosperidad Techo	Metavolcánico argilizado	Nv-1200	GL-616
M-04	Prosperidad Techo	Metavolcánico argilizado	Nv-1200	GL-616
M-05	Prosperidad I	Metavolcánico mineralizado	Nv-1200	TJ-150
M-06	Andaychagua	Metavolcánico argilizado	Nv-1275	TJ-600
M-07	Andaychagua	Metavolcánico argilizado	Nv-1275	TJ-600
M-08	Andaychagua	Filita Silicificada	Nv-1275	TJ-600
M-1	Salvadora	Metavolcánico	DDH-U-AN-19-099	
M-2	Salvadora	Metavolcánico	DDH-U-AN-19-099	
M-3	Salvadora	Filita	DDH-U-AN-19-099	
M-4	Salvadora	Mineral	DDH-U-AN-19-099	
M-5	Salvadora	Mineral	DDH-U-AN-19-099	
M-6	Salvadora	Filita	DDH-U-AN-19-099	
M-7	Salvadora	Metavolcánico	DDH-U-AN-19-103	

M-8	Salvadora	Mineral	DDH-U-AN-19-103
M-9	Salvadora	Mineral	DDH-U-AN-19-103
M-10	Salvadora	Mineral	DDH-U-AN-19-103
M-11	Salvadora	Filita	DDH-U-AN-19-103

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 7 y 8 siguientes contienen el resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de carga puntual y compresión uniaxial respectivamente.

Tabla 7

Ensayos de laboratorio - Resumen resultados carga puntual

Muestra	Zona	Litología	IS 50 (MPa)	UCS (MPa)
M-02	Andaychagua	Filita foliada	3,70	78,7
M-4	Salvadora	Mineral	3,75	82,39
M-5	Salvadora	Mineral	2,39	52,63
M-7	Salvadora	Metavolcánico	2,89	63,47
M-9	Salvadora	Mineral	3,59	78,89
M-10	Salvadora	Mineral	3,19	70,26

Nota. Elaboración propia.

Tabla 8

Ensayos de laboratorio - Resumen resultados compresión uniaxial

Muestra	Zona	Litología	UCS (MPa)
M-01	Andaychagua	Filita Silicificada	29,9
M-02	Andaychagua	Filita Foliada	41,0
M-03	Prosperidad Techo	Metavolcánico argilizado	55,4
M-05	Prosperidad I	Metavolcánico mineralizado	65,0
M-1	Salvadora	Metavolcánico	50,64
M-2	Salvadora	Metavolcánico	43,26
M-3	Salvadora	Filita	47,38
M-11	Salvadora	Filita	24,04

Nota. Elaboración propia.

Además, en laboratorio también se han realizado ensayos de tracción indirecta, los cuales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Ensayos de Laboratorio - Resumen resultados tracción indirecta

Muestra	Zona	Litología	Resistencia a la tracción (MPa)
M-04	Prosperidad Techo	Metavolcánico argilizado	7,3
M-05	Prosperidad I	Metavolcánico mineralizado	11,9
M-06	Andaychagua	Metavolcánico argilizado	11,7
M-08	Andaychagua	Filita Silicificada	1,9
M-1	Salvadora	Metavolcánico	9,02
M-6	Salvadora	Filita	6,93

Nota. Elaboración propia.

Otro parámetro importante del comportamiento mecánico de la roca intacta es la constante "mi" de la roca intacta del criterio de falla de Hoek y Brown (2002). Este parámetro fue determinado a partir de los ensayos de compresión triaxial. En cada ensayo de compresión triaxial se realizaron 9 roturas con la finalidad de tener una mayor aproximación de los parámetros de resistencia de la roca intacta. La Tabla 10 muestra el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 10

Ensayos de laboratorio - Resumen resultados compresión triaxial

Muestra	Litología	UCS (MPa)	mi	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción interna (°)
M-02	Filita Foliada	49,02	11,00	11,17	42,40
M-04	Metavolcánico argilizado	52,03	17,48	11,84	45,94
M-05	Metavolcánico mineralizado	49,69	15,07	10,85	45,47
M-06	Metavolcánico argilizado	54,96	16,41	11,50	47,01

M-08	Filita Silicificada	55,81	14,82	12,40	45,06
M-2	Metavolcánico	44,60	15,10	9,99	45,17

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, respecto a la roca intacta, también se han llevado a cabo ensayos de propiedades físicas a fin de conocer los parámetros de densidad, absorción y porosidad de las muestras de mineral y la roca estéril encajonante. En la siguiente tabla 11, se muestran los resultados.

Tabla 11

Ensayos de laboratorio - Resumen resultados propiedades físicas

Muestra	Litología	Porosidad Aparente (%)	Absorción (%)	Densidad seca (g/cm3)	Peso específico aparente (kN/m3)
M-02	Filita Foliada	1,21	0,43	2,80	27,68
M-04	Metavolcánico argilizado	3,74	1,30	2,87	28,34
M-05	Metavolcánico mineralizado	5,66	2,12	2,68	26,59
M-06	Metavolcánico argilizado	2,24	0,79	2,84	28,03
M-08	Filita Silicificada	3,94	1,43	2,79	27,27
M-1	Metavolcánico	0,60	-	2,78	27,32
M-3	Filita	1,59	-	2,82	27,76
M-4	Mineral	3,03	-	3,49	34,54
M-7	Metavolcánico	2,18	-	2,87	28,34
M-8	Mineral	2,99	-	3,39	33,50

Nota. Elaboración propia.

Desde el punto de vista de la estabilidad controlada por las discontinuidades estructurales, es importante conocer las características de resistencia al corte de las

discontinuidades, ya que éstas constituyen superficies de debilidad de la masa rocosa y por tanto planos potenciales de falla. La resistencia al corte en este caso está regida por los parámetros de fricción y cohesión del criterio de falla Mohr-Coulomb. Estos parámetros fueron obtenidos mediante ensayos de corte directo en superficies de discontinuidades simuladas como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12

Ensayos de laboratorio - Resumen resultados corte directo

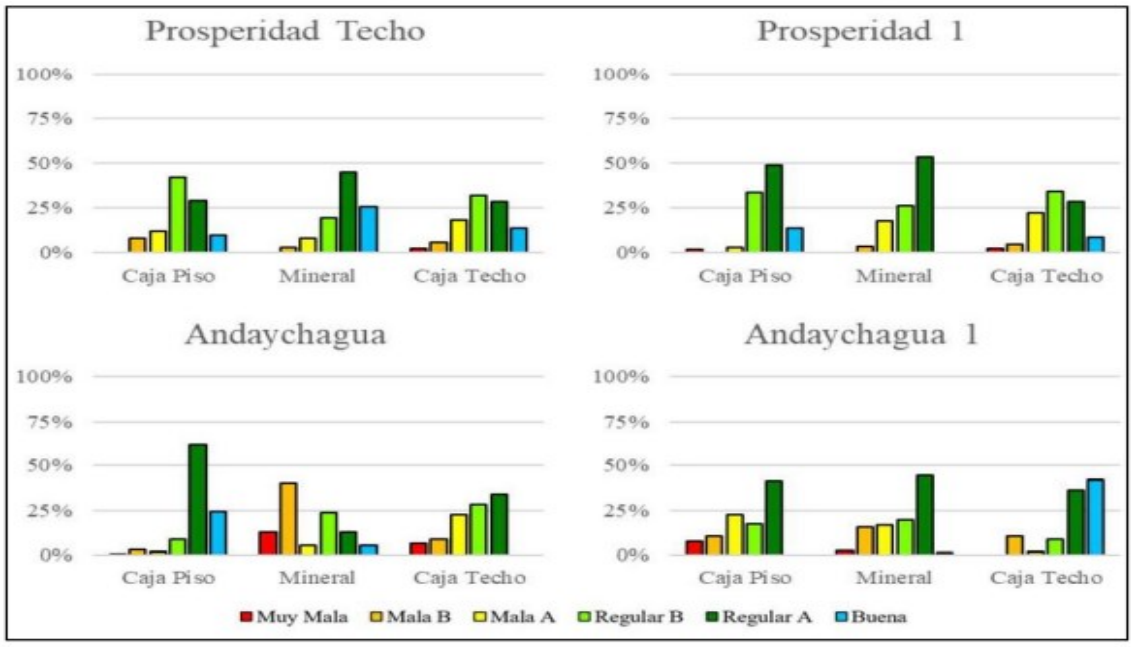
Muestra	Zona	Litología	Tipo de discontinuidad	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fric. Res. (**φ**)
M-04	Prosperidad Techo	Metavolcánico argilizado	Simulada	0,097	29,94
M-05	Prosperidad I	Metavolcánico mineralizado	Simulada	0,111	31,50
M-06	Andaychagua	Metavolcánico argilizado	Simulada	0,102	29,90
M-08	Andaychagua	Filita Silisificada	Simulada	0,117	30,94
M-1	Salvadora	Metavolcánico	Simulada	0,136	28,97
M-2	Salvadora	Filita	Simulada	0,129	31,83
M-8	Salvadora	Mineral	Simulada	0,150	30,85
M-11	Salvadora	Filita	Simulada	0,089	30,32

Nota. Elaboración propia.

En cuanto a la información para clasificar a la masa rocosa de las 5 zonas en estudio, ésta proviene principalmente del logueo geotécnico de testigos rocosos (7 317 m) complementado con el mapeo geomecánico de la masa rocosa en las labores subterráneas (42 estaciones). En resumen, se muestran en la Figura 5 y Figura 6 la clasificación de la masa rocosa de RMR y RQD para la caja piso, mineral y caja techo en cada las zonas Prosperidad techo, Prosperidad 1, Andaychagua y Andaychagua 1.

Figura 5

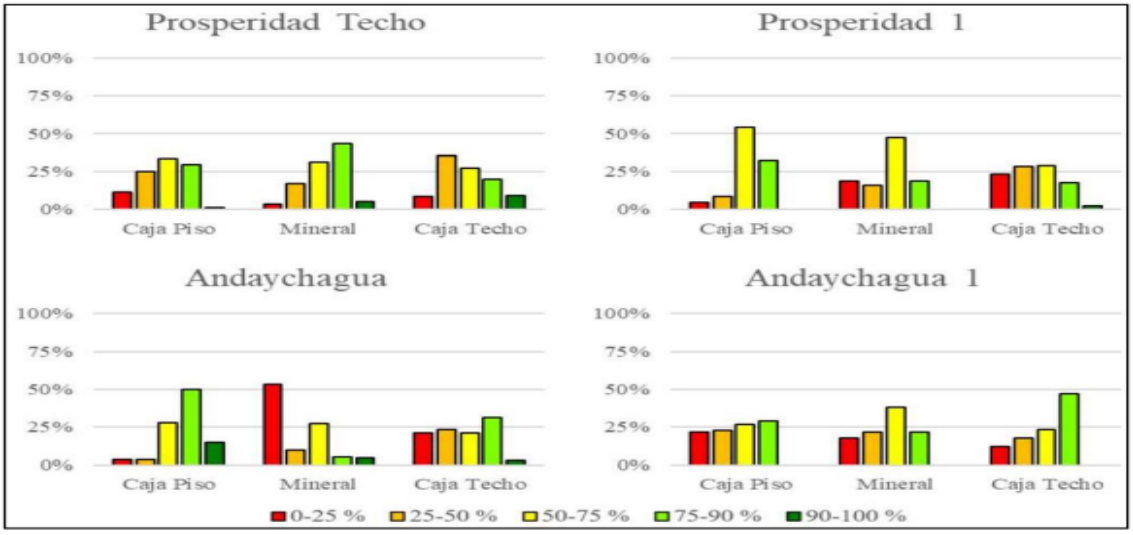
Clasificación RMR en la caja piso, mineral y caja techo por zonas



Nota. Elaboración propia.

Figura 6

Clasificación RQD en la caja piso, mineral y caja techo por zonas



Nota. Elaboración propia.

Para el Cuerpo de Salvadora, se presentará la siguiente Tabla 13 con la clasificación geomecánica correspondiente por sectores:

Tabla 13

Clasificación geomecánica correspondiente por sectores

Sector	Litología	RMR promedio	Tipo de roca
Caja techo alejada	Meta Volcánico	52	Regular A (IIIA)
Caja techo inmediata	Meta Volcánico	42	Regular B (IIIB)
Estructura	Mineral	57	Regular A (IIIA)
Estructura	Mineral	47	Regular B (IIIB)
Caja piso inmediata	Filita	34	Mala A (IVA)
Caja piso alejada	Filita	46	Regular B (IIIB)

Nota. Elaboración propia.

En caso de la zona Prosperidad Techo se obtuvo que, en la caja piso y caja techo, existen principalmente las calidades: Regular A (IIIA); mientras que, en el mineral se presentan principalmente las calidades: Buena (II), Regular A (IIIA).

Para la zona Prosperidad 1; en la caja piso existen principalmente las calidades: Regular A (IIIA) y Regular B; mientras que, en el mineral y la caja techo, principalmente se presentan las calidades: Regular A (IIIA), Regular B (IIIB) y Mala A (IVA).

En la zona Andaychagua; en la caja piso existen principalmente las calidades: Buena (II), Regular A (IIIA) y Regular B (IIIB); mientras que, en el mineral y la caja techo, principalmente se presentan las calidades: Regular A (IIIA), Regular B (IIIB), Mala A (IVA) y Mala B (IVB).

En el caso de la zona Andaychagua 1, en la caja piso y el mineral existen principalmente las calidades: Regular A (IIIA), Regular B (IIIB), Mala A (IVA) y Mala B (IVB). En la caja techo, se presentan principalmente las calidades: Buena (II) y Regular A (IIIA).

Por último, para la zona Salvadora, en la caja techo alejada se presenta una roca Regular A (IIIA), mientras que en la caja techo inmediata predomina la calidad Regular B (IIIB). Por otro lado, en el mineral se observan dos calidades principales: Regular A

(IIIA) y Regular B (IIIB); en la caja piso inmediata la calidad principal es Mala A (IVA) y en la caja piso alejada predomina la calidad Regular B (IIIB).

A modo de ejemplo, en la Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17 se puede observar la clasificación en la sección transversal ST-000 y ST-5 para el Cuerpo Prosperidad Techo y Salvadora, para lo cual se ha considerado definir a los dominios geomecánicos, principalmente en base a tres parámetros: caja techo, caja piso y mineral. Estos tres dominios estarán diferenciados por zonas de minado, debido a que cada una de estas presentan dominios estructurales, litología propia y propiedades de resistencias propias.

Tabla 14

Dominios geomecánicos por zona - GSI, UCS y tipo de roca

Zona	Dominio geomecánico	Litología	GSI	ci (MPa)	Tipo de roca
Prosperidad Techo	Caja piso	Meta volcánico	50	70	Regular B (IIIB) y Mala A (IVA)
	Caja piso	Meta volcánico Argilizado	42	60	Regular B (IIIB) y Mala A (IVA)
	Caja techo	Filita	32	30	Regular B (IIIB) y Mala A (IVA)
	Mineral	Mineral	48	70	Regular A (IIIA) y Regular B (IIIB)
Prosperidad 1	Caja piso	Meta volcánico	54	80	Regular B (IIIB)
	Caja techo	Meta volcánico Argilizado	46	65	Regular B (IIIB) y Mala A (IVA)
	Caja techo	Filita	34	30	Regular B (IIIB) y Mala A (IVA)
	Mineral	Mineral	50	75	Regular B (IIIB) y Mala A (IVA)
Andaychagua	Caja piso / Caja techo	Meta volcánico Argilizado	45	60	Regular B (IIIB) y Mala A (IVA)
	Caja piso / Caja techo	Filita foliada	24	25	Regular B (IIIB), Mala A (IVA) y Mala B (IVB)
	Mineral	Mineral	32	30	Regular B (IIIB), Mala A (IVA) y Mala B (IVB)
Andaychagua 1	Caja piso	Meta volcánico	56	85	Regular B (IIIB), Mala A (IVA) y Mala B (IVB)
	Caja techo	Meta volcánico Argilizado	45	60	Regular A (IIIA) y Regular B (IIIB)
	Mineral	Mineral	54	80	Regular B (IIIB), Mala A (IVA) y Mala B (IVB)
Salvadora	Caja techo alejada	Meta volcánico	52	50	Regular A (IIIA)
	Caja techo inmediata	Meta volcánico	42	40	Regular B (IIIB)
	Mineral	Mineral	47	50	Regular B (IIIB)
	Mineral	Mineral	35	40	Mala A (IVA)
	Caja piso inmediata	Filita	46	40	Regular B (IIIB)
	Caja piso alejada	Filita	36	20	Mala A (IVA)

Nota. Elaboración propia.

Tabla 15

Resumen de propiedades físicas (SVS 2014, DCR 2010)

Sondaje	Bloque/ Profundidad	Litología	Porosidad aparente (%)	Absorción (%)	Densidad seca (g/cm3)
Geotec-01	-	Volcánico	0,564	0,211	2,668
Geotec-01	-	Filita	0,532	0,192	2,763
Geotec-02	-	Filita	2.373	0,861	2,763
-	M1	Mineral	1,857	0,542	3,529
AN-31-950-10	122.30-122.45	Filita (argilizada)	1,23	0,440	2,780
DDH-12-U-AN-001	249.90-250,07	Volcánico	1,73	0,610	2,830

Nota. Elaboración propia.

Tabla 16

Resumen de propiedades físicas por litología (DCR, 2018)

Muestra	Litología	Porosidad Aparente (%)	Absorción (%)	Densidad seca (g/cm3)	Peso específico aparente (kN/m3)
M-02	Filita foliada	1,21	0,43	2,80	27,68
M-04	Metavolcánico argilizado	3,74	1,30	2,87	28,34
M-05	Metavolcánico mineralizado	5,66	2,12	2,68	26,59
M-06	Metavolcánico argilizado	2,24	0,79	2,84	28,03
M-08	Filita silicificada	3,94	1,43	2,79	27,27

Nota. Elaboración propia.

Tabla 17

Resumen de propiedades físicas por litología (DCR, 2019)

Muestra	Litología	Porosidad Aparente (%)	Densidad seca (g/cm3)	Peso específico aparente (kN/m3)
M-1	Metavolcánico	0,60	2,78	27,32
M-3	Filita	1,59	2,82	27,76
M-4	Mineral	3,03	3,49	34,54
M-7	Metavolcánico	2,18	2,87	28,34
M-8	Mineral	2,99	3,39	33,50

Nota. Elaboración propia.

Zonificación geomecánica de la masa rocosa

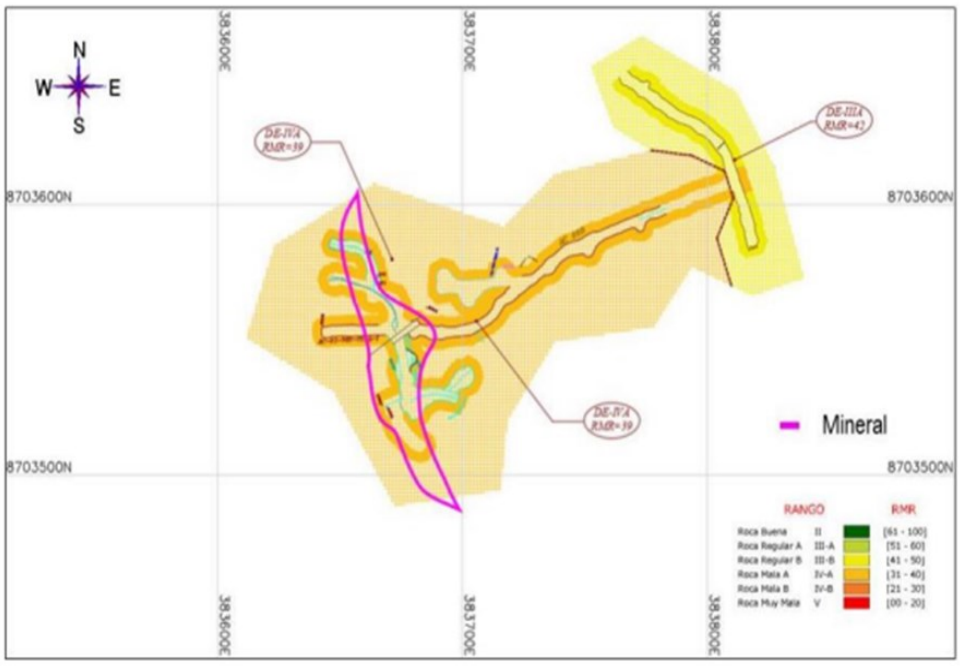
Una zonificación geomecánica es la determinación de dominios estructurales del macizo rocoso, es decir, extensiones de roca que comparten características similares, considerando información sobre la litología, sus calidades y particularidades estructurales en las discontinuidades, empleando los criterios de clasificación geomecánica. (Cuyubamba, 2019).

d) Mina Carahuacra

En la Mina Carahuacra, para realizar la zonificación geomecánica se ha tomado en cuenta los aspectos litológicos y la calidad de la masa rocosa. Por tanto, la Figura 7 muestra en planta el resultado de esta zonificación en el Ac. 850 - cuerpo Galáctico. Finalmente, las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos en 12 secciones transversales definidas.

Figura 7

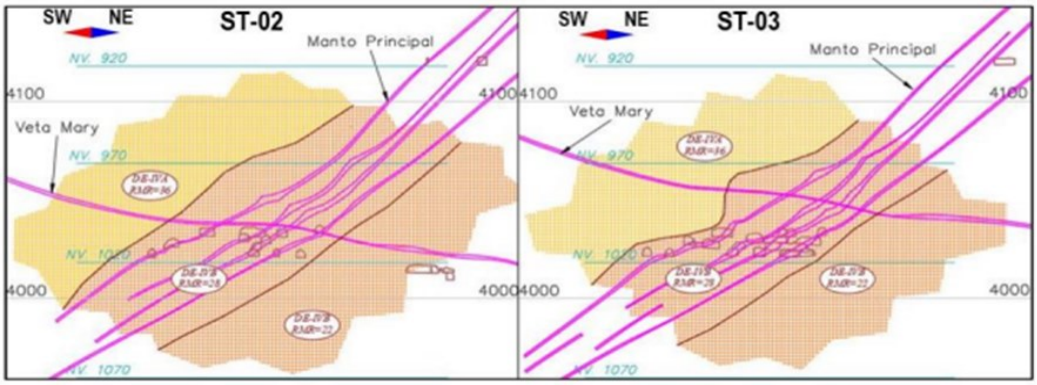
Zonificación geomecánica en planta (cuerpo galáctico)



Nota. Elaboración propia.

Figura 8

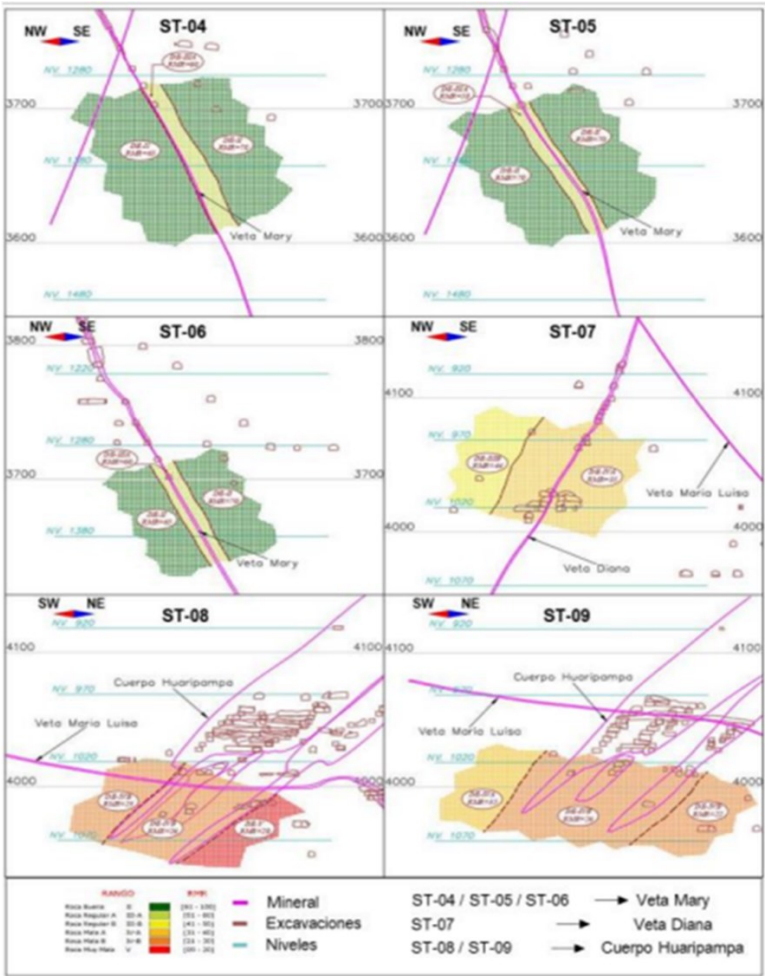
Zonificación RMR en las secciones ST-02 y ST-03 (manto Principal Techo)



Nota. Elaboración propia.

Figura 9

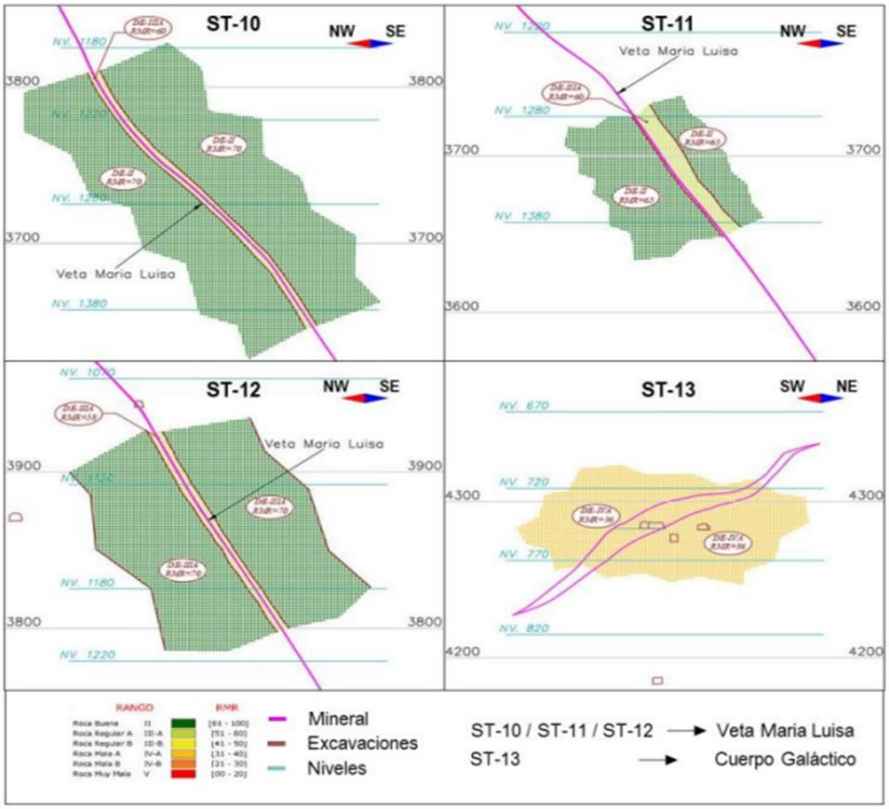
Zonificación RMR en las secciones ST-04 a ST-09



Nota. Elaboración propia.

Figura 10

Zonificación RMR en las secciones ST-10 a ST-13



Nota. Elaboración propia.

A partir de las secciones de zonificación realizada, las mismas muestran una representación aceptable con relación a la calidad resultante, por lo que lo obtenido puede ser representativo en cada estructura mineralizada. En resumen, para la masa rocosa involucrada con el minado de las 7 estructuras en estudio, se puede mencionar lo siguiente:

Como resultado de la zonificación geomecánica, para el Manto Principal Techo se concluye que, tanto el mineral y la roca encajonante se encuentran en el dominio estructural DE-IVB con un RMR promedio de 28. Hacia la caja piso alejada alrededor de 10 m la calidad disminuye, pero se halla dentro del mismo dominio. Hacia la caja techo alejada alrededor de 15 m, la calidad pasa al dominio DE-IVA con un RMR promedio de 36.

Para la Veta Mary, los resultados indican que el mineral y las cajas inmediatas se hallan en el dominio DE-IIIA; además, ya sea para el caso de las cajas alejadas y en tramos de la caja piso inmediata, la calidad se halla en el dominio DE-II.

Según lo observado en campo, en la Veta Diana se estima que la calidad se encuentra entre el dominio DE-IVA y dominio DE-IVB, con un valor estimado de 30, tanto para el mineral y las cajas. En el caso de la Veta María Luisa, los dominios son los mismos que se han descrito para la Veta Mary. Por otro lado, en la Veta Paula Techo no se encontró información.

Para el Cuerpo Huaripampa se concluye que, tanto el mineral y la roca encajonante se encuentran en el dominio estructural DE-IVB. En el caso del mineral y la roca caja techo el RMR promedio es de 26 y para la caja piso el valor se reduce a 21. Hacia el extremo NW del cuerpo se observa que la caja techo alejada mejora al dominio DE-IVA con un RMR promedio de 35. Y, por último, en el Cuerpo Galáctico, según la información, se obtuvo que pertenecería al dominio DE-IVA con un valor de RMR igual a 36, tanto para el caso del mineral y la roca encajonante.

e) Mina Andaychagua:

En la Mina Andaychagua, las características litológicas de la masa rocosa circundante a las zonas en estudio son las siguientes:

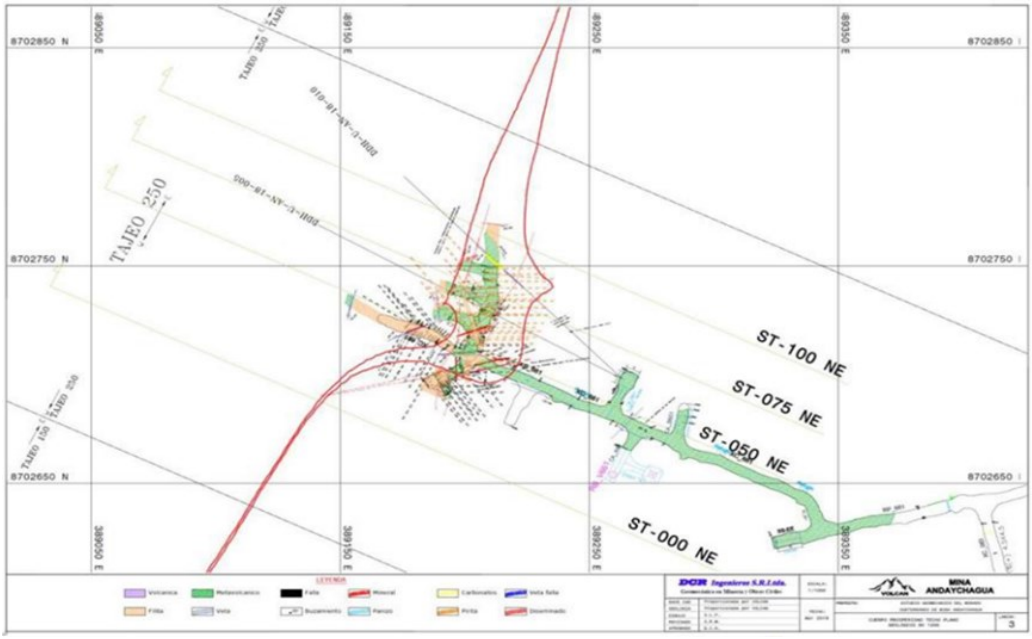
Prosperidad Techo y Prosperidad, en la cual los cuerpos mineralizados se encuentran emplazados en roca meta volcánica en ambas cajas (piso y techo), además, existe la presencia de filitas que, por lo general, marcan la interrupción de la mineralización.

La veta Andaychagua, que está emplazada en una intercalación de roca filita y meta volcánica. Dicha intercalación está presente en la caja techo y caja piso entre los Niveles 1250 a 1275; como una tendencia general, la filita está presente en la caja techo alejada. Asimismo, la Veta Andaychagua 1, la cual presenta en la caja piso (NW) un diseminado volcánico, además, en la caja techo (SE) se encuentra roca meta volcánica.

Cabe señalar que, no se cuenta con un modelo litológico tridimensional, la información que se maneja es obtenida a partir de los mapeos y zonificaciones geomecánicas realizadas en planta y secciones transversales. Sin embargo, la empresa Wood se encuentra actualmente desarrollando un informe geomecánico y dentro de sus alcances está la realización de un modelo actualizado, el cual servirá para complementar la información litológica de la unidad.

Figura 11

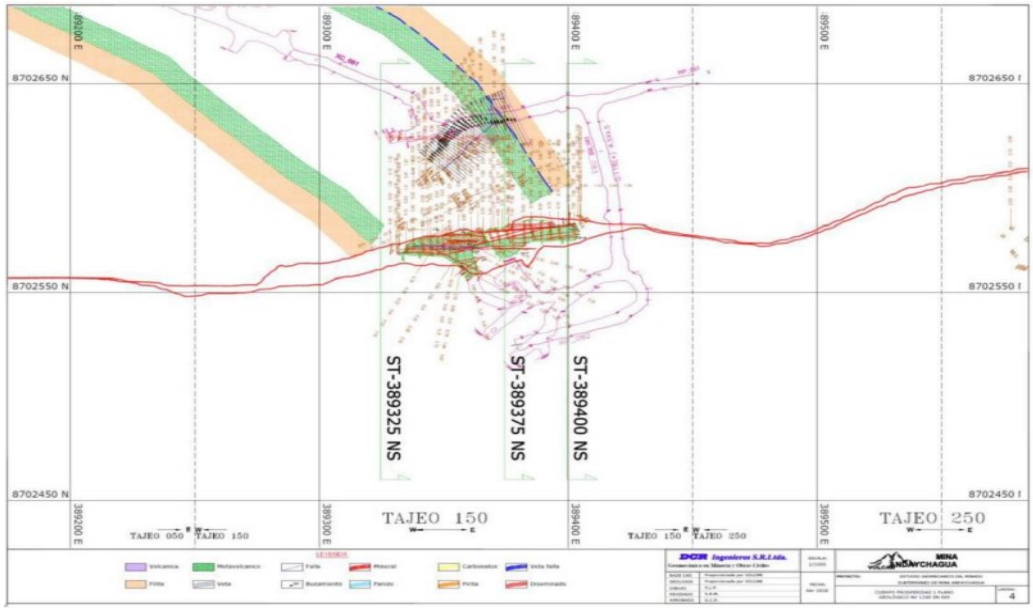
Sección litológica de Prosperidad Techo-Nivel 1200



Nota. Elaboración propia.

Figura 12

Sección litológica de Andaychagua Nivel 1200 TJ 500



Nota. Elaboración propia.

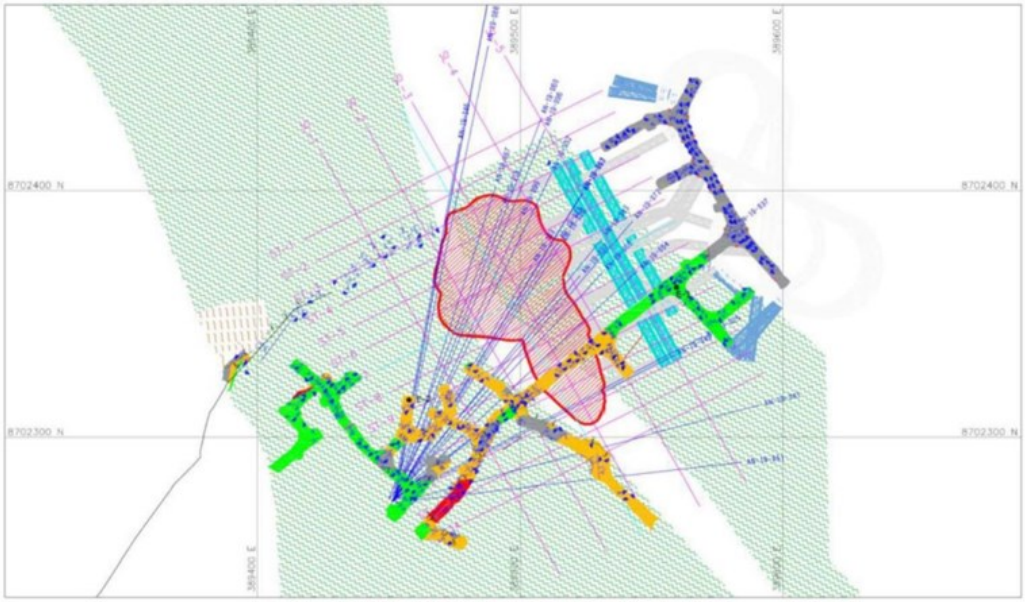
Figura 13

Sección litológica de Salvadora Nivel 1300

Nota. Elaboración propia.

Figura 14

Sección litológica de Prosperidad 1-Nivel 1200



Nota. Elaboración propia.

f) Mina Atacocha:

La caracterización geomecánica aplicada en mina Atacocha, está basada en la aplicación del GSI, (Índice de Resistencia Geológica), el cual es aplicado en las operaciones de la mina. Para la zonificación geomecánica de la mina, la cual está clasificada en tres zonas o secciones, se han adoptado los siguientes estándares de la masa rocosa:

1. La Sección San Gerardo, en la que predomina la calidad de roca MF/P – IF/MP, es decir, Moderadamente Fracturado/Pobre (roca de baja calidad geotécnica), Intensamente Fracturado/Moderadamente Pobre (roca de muy baja calidad geotécnica).
2. La Sección Santa Bárbara, en la que predomina la calidad de roca MF/R, es decir, Moderadamente Fracturado/Regular (roca de mediana calidad geotécnica).
3. La Sección Atacocha, en la que predomina la calidad de roca MF/R, es decir, Moderadamente Fracturado/Regular (roca de mediana calidad geotécnica).

Distribución de discontinuidades

Los macizos rocosos están conformados por una serie de planos de debilidad o discontinuidades, como diaclasas, fallas, planos de estratificación, foliación y esquistos, los cuales tienen origen mecánico, sedimentario, tectónico y metamórfico. Estas discontinuidades "están presentes en la roca y afectan la resistencia, permeabilidad y durabilidad de la masa" (Cabrera, 2010). Además, "las superficies o planos de discontinuidades de los macizos rocosos condicionan de una forma definitiva sus propiedades y comportamiento" (Correa, 2014).

Las discontinuidades imprimen un carácter discontinuo y anisotrópico a los macizos rocosos, haciéndolos más deformables y débiles (Correa, 2014). En consecuencia, "es importante evaluar la geometría, naturaleza, estado y condición de las discontinuidades, porque ellas definen la composición estructural del macizo rocoso" (Cabrera, 2010). Estas discontinuidades determinan el comportamiento geomecánico, provocando una matriz rocosa no continua y, en su mayoría, anisotrópica, lo cual influye en los mecanismos de deformación y rotura.

Para evaluar la calidad del macizo rocoso, se utilizan clasificaciones geológicas basadas en el análisis y división de la unidad en áreas. En el caso de la Mina San Cristóbal, se establecieron las zonas de los sistemas de discontinuidades, identificando 4 sistemas principales compartidos entre la Veta 658, Veta Split 658, Veta 722 y Veta Ramal Piso 722. Tras el análisis de cada sistema individualmente, se observó una similitud en el rumbo NE para los sistemas 2 y 3, pero con buzamientos contrarios. Estos sistemas contribuyen a la generación de falsas cajas en las estructuras mineralizadas.

Tabla 18

Sistemas de discontinuidades estructurales principales

Descripción	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Veta 658	N220/50	N335/70	N150/80	N 70/60
Veta Split 658	N 210/60	N 340/80	N 160/80	N 120/70
Veta 722	N 220/54	N340/80	N 160/80	N 90/60

Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, la Mina Andaychagua presenta 5 sistemas de discontinuidades divididos en diferentes zonas como se puede observar en la Tabla 19, primeramente, la zona Prosperidad Techocuyos pese sistemas principales que están conformados por diaclasas oblicuas hacia el rumbo del cuerpo, la gran parte de fallas y venillas perpendiculares al rumbo promedio se encuentran en los sistemas 4 y 5.

Seguidamente Prosperidad 1 con diaclasas en todos los sistemas, venillas en los sistemas 1 y 4 y fallas en 1 y 6; mientras la zona Andaychagua presenta sistemas paralelos a la veta a diferencia del sistema 3 que se encuentra de manera perpendicular, además de la presencia de diaclasas y fallas en todos los sistemas; Andaychagua 1 muestra diaclasamiento en todos los sistemas, así como fallas únicamente en el sistema 3; con los sistemas 1 y 4 oblicuos rumbo a la veta, el sistema 2 perpendicular y el sistema 3 paralelo, finalmente la zona Salvadora posee el sistema 1 como principal área de discontinuidades y una perpendicularidad del sistema 4 y 5 con respecto al sistema 1.

Tabla 19

Sistemas de discontinuidades estructurales principales

Zona	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 5
Prosperidad Techo	N06°W/37°NE	N34°W/66°NE	N14°W/55°SW	N61°E/72°SE	N78°E/80°NW
Prosperidad 1	N81°E/59°SE	N32°E/44°SE	N29°W/68°SW	N59°E/44°NW	N13°W/51°NE
Andaychagua	N30°E/75°SE	N81°E/58°SE	N40°W/47°SW	N68°E/74°NW	N14°E/67°N
Andaychagua 1	N17°E/65°SE	N40°W/68°SW	N67°E/86°SE	N02°E/75°NW	-
Salvadora	N46°E/83ºSE	N11ºE/75ºNW	N79ºE/58ºSE	N33ºW/69ºSW	N69ºW/73ºSW

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, en el análisis de las discontinuidades en la Mina Atacocha se determinaron por medio del registro lineal que corresponde al Stope Piloto 097 los

sistemas de DIP/DDIP = 40º/210º y DIP/DDIP = 60º/172, además de fallas asociadas a los sistemas de DIP/DDIP = 75º65º/40º

Aspectos estructurales

Son formados en los macizos rocosos mediante diferentes deformaciones y/o movimientos generados en gran magnitud por masas rocosas después de sufrir un emplazamiento, además de poder efectuarse tras pasar por un proceso de consolidación. Dentro de los aspectos estructurales que son más comunes se encuentran los pliegues, fallas e incluidas las diaclasas. La forma de descripción involucra la orientación, el espaciado perpendicular entre los planos que se encuentran de forma consecutiva, así como la extensión, las ondulaciones o irregularidades.

Fallas

Las fallas inversas son parte de la Mina San Cristóbal debido a los esfuerzos de compresión, caracterizados por presentar un relleno de arcilla y panizo hasta 50 cm, con aperturas menores entre 0,5 y 5 cm, además de caras lisas, rugosas o con espejos de fallas. Este tipo de falla está asociada a las vetas mineralizadas y en la roca encajonante, que muestra que la mineralización sigue las zonas de debilidad.

En cuanto a la presencia de fallas en la Mina Andaychagua presenta características específicas que las describen:

- Espaciamiento: por lo general de 5 a 20 m.
- Persistencia: es de decenas de metros.
- Apertura: menor a 5 mm.
- Rugosidad: lisas presentan espejos de fallas.
- Relleno: materiales de arcilla, panizo, brechas y materiales oxidados.
- Espesor del relleno: varía entre 5 y 50 cm.
- Agua: las fallas favorecen la presencia de agua.

En cuanto al caso de la Mina El Porvenir, se encuentra presente la falla Milpo Atacocha, la cual forma parte de la estructura en el que los cuerpos intrusivos en relación con la mineralización se favorecen por este sistema de falla hacia el NO-SE, así mismo esta falla Milpo Atacocha es compartida en la unidad Minera Atacocha.

Diaclasas

Para la Mina San Cristóbal se presenta diaclasas con paredes de discontinuidades moderadamente alteradas hasta sanas en algunos sectores, además de las siguientes características:

- Espaciamiento: por lo general de 6 a 20 cm, en menor proporción de 25 a 70 cm
- Persistencia: de 1 a 3 m y de 3 a 10 m.
- Apertura: de 1 a 5 mm.
- Rugosidad: ligeramente rugosas y lisas.
- Relleno: suave con presencia de arcilla y óxidos

En cuanto a las diaclasas presentes en la Mina Andaychagua se encuentran distribuidas en 5 zonas específicas como se muestra en la Tabla 20, las cuales poseen ciertas características similares con respecto a la Mina San Cristóbal en cuanto a persistencia, apertura y rugosidad, más diferenciándose en las siguientes:

- Espaciamiento: por lo general de 6 a 20 cm.
- Relleno: suave menor a 5 mm y también duro mayor a 5 mm.

Tabla 20

Moda de los aspectos estructurales de las diaclasas por litología

	Unid.	Filita	Metavolcánico	Mineral
Espaciamiento	cm	(6 a 20)	(6 a 20) y (20 a 60)	(6 a 20) y (20 a 60)
Persistencia	m	(1 a 3)	(1 a 3)	(3 a 10)
Apertura	mm	(1 a 5)	(1 a 5)	(1 a 5)
Rugosidad	-	Lig. rug. y Lisa	Lig. rug.	Lig. rug.

Relleno	mm	Suave < 5	Duro < 5	Suave < 5
Alteración	mm	Moderada	Moderada	Moderada

Nota. Elaboración propia.

Resistencia de la roca

Depende de diferentes condiciones entre los que se encuentra la magnitud que ejercen los esfuerzos confinantes y la carga de rotura, además de la posibilidad de presencia de agua dentro de los poros, así mismo se efectúa el análisis para determinar la resistencia de la roca intacta, discontinuidades y otros factores que puedan llegar a la caracterización de una manera más precisa; yacen pruebas de análisis que proporcionan estos datos necesarios como son las propiedades de índice y mecánicas, apoyados en los criterios de rotura de Mohr-Coulumb para la determinación de ser necesario de <de defectos estructurales.

a) Mina Carahuacra:

Por medio de ensayos triaxiales para determinar las condiciones de la roca intacta, con rotura, se efectuaron ensayos especiales con la finalidad de obtener la existencia de susceptibilidad de rotura por acumulación de energía ante la posibilidad de deformación de esta, obteniendo los resultados que se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21

Resultados de los ensayos de carga y descarga variable

Código de muestra	Litología	Resistencia a la Compresión Uniaxial (MPa)	Módulo de elasticidad "E" (GPa)
M-16-A	Andesita	84,96	28,49
M-24-A	Andesita	152,87	34,19
M-24-B	Andesita	158,71	--
M-33-A	Dacita	103,88	27,22
M-33-B	Dacita	105,96	--
M-33-C	Dacita	115,11	--

Nota. Elaboración propia.

Contemplando la estabilidad de la masa rocosa ante la presencia de discontinuidades estructurales se muestra los datos obtenidos en la Tabla 22, tras realizar ensayos de resistencia al corte contemplando parámetros de fricción y cohesión del criterio de falla de Mohr-Coulomb.

Tabla 22

Resultados de los ensayos de corte directo

Litología	Tipo de discontinuidad	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (f)
AND	Simulada	0,332	40,71
	Simulada	0,091	34.68
DAC	Simulada	0,442	37.33
CLZ	Simulada	0	40,17
MIN	Simulada	0,077	30,22

Nota. Elaboración propia.

Los parámetros de resistencia de la masa rocosa fueron estimados mediante el criterio de falla de Hoek y Brown (2002), además, para estimar el módulo de deformación de la masa rocosa se empleó la ecuación de Hoek y Diederichs (2006). La Tabla 23 presenta de manera resumida los parámetros de la roca intacta de las 6 estructuras mineralizadas en estudio. Es importante mencionar que se trabajó con un factor de perturbación equivalente a D=0.

Tabla 23

Parámetros de resistencia de la masa rocosa

Estructura	Sector	Litología	GSI*	σci (MPa)	g (kN/m3)	"mi"	mb	smr	*E*mr MPa	*v*
Principal Techo	Caja tec.	Caliza	36	35	27	13	1,322	0,000816	2124	0,35
	Manto	Mineral	28	15	36.1	16	1,223	0,000336	538	0,38
	Caja piso	Caliza	28	15	27	13	0,994	0,000336	538	0,38
	Caja piso	Caliza	22	10	27	13	0,802	0,000172	253	0,39
Huaripampa	Caja tec.	Caliza	35	30	27	13	1,276	0,00073	1701	0,35
	Caja tec.	Caliza	26	15	27	13	0,925	0,000269	476	0,38
	Cuerpo	Mineral	26	15	28	16	1,139	0,000269	476	0,38
	Caja piso	Caliza	21	5	27	13	0,774	0,000154	120	0,39
Mary y María Luisa	Caja tec.	Volcánico	65	120	27	18	5,157	0,020468	30323	0,32
	Caja tec.	Volcánico	60	100	27	18	4,314	0,011744	20800	0,32
	Veta	Mineral	58	80	42	18	4,016	0,009404	15189	0,33
	Caja piso	Volcánico	60	100	27	18	4,314	0,011744	20800	0,32
	Caja piso	Volcánico	65	120	27	18	5,157	0,020468	30323	0,32
Diana	Caja tec.	Caliza	35	25	27	13	1,276	0,00073	1418	0,35
	Veta	Mineral	35	25	35	16	1,57	0,00073	1418	0,35
	Caja piso	Caliza	35	25	27	13	1,276	0,00073	1418	0,35
Galáctico	Caja tec.	Caliza	36	30	27	13	1,322	0,000816	1821	0,35
	Cuerpo	Mineral	36	30	35	16	1,627	0,000816	1821	0,35
	Caja piso	Caliza	36	30	27	13	1,322	0,000816	1821	0,35

Nota. Elaboración propia.

Donde:

- GSI: Calidad de la masa rocosa GSI = RMR (para condiciones húmedas).
- σci: Resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta.
- У: Densidad de la roca intacta.
- mi: Constante de la roca intacta.
- mb: Constante de la masa rocosa.
- smr: Constante de la masa rocosa.
- Emr: Módulo de deformación de la masa rocosa.
- v: Relación de Poisson de la masa rocosa.

En cuanto a las condiciones del agua subterránea se determina una precipitación media fue de 873 mm/año, variando en la estación húmeda (85 % noviembre a marzo) y en la estación seca (15 % abril a octubre), alcanzando como punto máximo 1075.4 mm/año, y la mínima 645.4 mm/año. Se diferenciaron 3 unidades hidrogeológicas con predominancia de rocas intrusivas y volcánicas, cubierta por suelos fluvioglaciares. Un sistema hidrogeológico complejo, dentro de un medio de rocas volcánicas e intrusivas de baja a media conductividad hidráulica.

Los resultados de conductividad hidráulica para rocas intrusivas fracturadas indican variabilidad entre “baja a media” (0,16 a 0,19 m/d). Se presenta tres facies: la facie dominante “Sulfatada - Cálcica” ($CaSO_4$), correspondiente a agua subterránea en contacto con cuerpos mineralizados; la facie “Bicarbonatada Cálcica - Magnésica” (Mg-$CaHCO_3$); y la facie “Bicarbonatada Sódica” ($NAHCO_3$).

El caudal anual por efecto de la profundización de mina fluctúa entre 123,7 l/s para el año 2018, de 135,5 l/s para el año 2019, de 143,9 l/s para el 2020, 150,4 l/s para el 2021, 155,7 l/s para el 2022, y para el año 2023 de 160,2 l/s. Mas se estima que las descargas subterráneas se incrementarán en el orden de 11,1 l/s a 59,3 l/s.

b) Mina San Cristóbal

Detrás de las capas de discontinuidades la calidad del macizo rocoso mejora sustantivamente. Este hecho permite que los subniveles puedan mantenerse estables mientras dure el tiempo de preparación de estas labores hasta concluir la excavación del nivel principal.

c) Mina Andaychagua

Para determinar los parámetros de resistencia se ha tenido en cuenta en todos los casos la información de mayor relevancia son los resultados de los ensayos actuales, más los ensayos previos han aportado información complementaria importante.

Uno de los parámetros más importantes del comportamiento mecánico de la roca intacta, es la resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta (δc) o denominada también UCS. En la Tabla 24 se muestran el resumen de los resultados de los ensayos en laboratorio.

Tabla 24

Ensayos de laboratorio - Resumen resultados compresión uniaxial

Muestra	Zona	Litología	UCS (MPa)
M-01	Andaychagua	Filita Silicificada	29,9
M-02	Andaychagua	Filita foliada	41
M-03	Prosperidad Techo	Metavolcánico argilizado	55,4
M-05	Prosperidad 1	Metavolcánico mineralizado	65
M-06	Andaychagua	Metavolcánico argilizado	49,5
M-1	Salvadora	Metavolcánico	50,64
M-2	Salvadora	Metavolcánico	43,26
M-3	Salvadora	Filita	47,38
M-11	Salvadora	Filita	24,04

Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, en campo se realizaron ensayos de carga puntual. Se ejecutó un muestreo de bloques para cada una de las 5 zonas en estudio, en cada bloque se realizaron 15 roturas con la modalidad de bloque irregular siguiendo lo establecido en la norma ASTM D5731-02. A continuación se muestra en la Tabla 25 el resumen de los resultados obtenidos del ensayo de campo.

Tabla 25

Ensayos de campo - Resumen resultados carga puntual

Muestra	Litología	Número de roturas	Is 50 (MPa)			
			Min	Max	Media	S.D.
M-01	Mineral	15	0,2	3	1,5	0,9
M-02	Filita silisificada	15	1,1	6,7	4,1	1,7
M-03	Mineral	15	1,2	8,9	3,7	2
M-04	Metavolcánico	15	1	5,7	3,5	1,2
M-05	Metavolcánico	15	3,5	11,6	7,7	2,7

Nota. Elaboración propia.

Para la presente evaluación se han realizado ensayos de laboratorio, en la Tabla 26 contienen el resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de carga puntual.

Tabla 26

Ensayos de laboratorio-Resumen resultados carga puntual

Muestra	Zona	Litología	Is 50 (MPa)	UCS (MPa)
M-02	Andaychagua	Filita foliada	3,7	78,7
M-4	Salvadora	Mineral	3,75	82,39
M-5	Salvadora	Mineral	2,39	52,63
M-7	Salvadora	Metavolcánico	2,89	63,47
M-9	Salvadora	Mineral	3,59	78,89
M-10	Salvadora	Mineral	3,19	70,26

Nota. Elaboración propia.

Además, en laboratorio también se han realizado ensayos de tracción indirecta, a continuación, se muestran los resultados en la Tabla 27 del ensayo de Tracción Indirecta.

Tabla 27

Ensayos de Laboratorio-Resumen resultados tracción indirecta

Muestra	Zona	Litología	Resistencia a la tracción (MPa)
M-04	Prosperidad Techo	Metavolcánico argilizado	7,3
M-05	Prosperidad 1	Metavolcánico mineralizado	11,9
M-06	Andaychagua	Metavolcánico argilizado	11,7
M-08	Andaychagua	Filita Silicificada	1,9
M-1	Salvadora	Metavolcánico	9,02
M-6	Salvadora	Filita	6,93

Nota. Elaboración propia.

Otro parámetro importante del comportamiento mecánico de la roca intacta es la constante "mi" de la roca intacta del criterio de falla de Hoek y Brown (2002). Este parámetro fue determinado a partir de los ensayos de compresión triaxial. Obteniendo los siguientes resultados plasmados en la Tabla 28.

Tabla 28

Ensayos de laboratorio - Resumen resultados compresión triaxial

Muestra	Litología	UCS (MPa)	mi	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción interna (o)
M-02	Filita foliada	49,02	11	11,17	42,4
M-04	Metavolcánico argilizado	52,03	17,48	11,84	45,94
M-05	Metavolcánico mineralizado	49,69	15,07	10,85	45,47
M-06	Metavolcánico argilizado	54,96	16,41	11,5	47,01
M-08	Filita Silicificada	55,81	14,82	12,4	45,06
M-2	Metavolcánico	44,6	15,1	9,99	45,17

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, la resistencia al corte en este caso está regida por los parámetros de fricción y cohesión del criterio de falla Mohr-Coulomb. Estos parámetros fueron obtenidos mediante ensayos de corte directo en superficies de discontinuidades simuladas, los cuales se muestran los siguientes resultados obtenidos en la Tabla 29.

Tabla 29

Ensayos de laboratorio-Resumen resultados corte directo

Muestra	Zona	Litología	Tipo de discontinuidad	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fric. Res.
M-04	Prosperidad Techo	Metavolcánico argil.	Simulada	0,097	29,94
M-05	Prosperidad 1	Metavolcánico mineral.	Simulada	0,111	31,5
M-06	Andaychagua	Metavolcánico argil.	Simulada	0,102	29,9
M-08	Andaychagua	Filita silisificada	Simulada	0,117	30,94
M-1	Salvadora	Metavolcánico	Simulada	0,136	28,97
M-3	Salvadora	Filita	Simulada	0,129	31,83
M-8	Salvadora	Mineral	Simulada	0,15	30,85
M-11	Salvadora	Filita	Simulada	0,089	30,32

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, en cuanto a la Resistencia del Macizo rocoso, fueron estimados mediante el criterio de falla de Hoek y Brown (2002), además, para estimar el módulo de Young de la masa rocosa se empleó la ecuación generalizada de Hoek y Diederichs (2006). Obteniendo valores representativos de la roca intacta y de la masa rocosa, mostrando el resumen de los resultados en la Tabla 3.

Tabla 30

Parámetros de resistencia de la masa rocosa

Zona	Litología	GSI	ci (MPa)	*3 MN/m*	mi	m	s	*E*mr (MPa)	Poisson *v*
Prosperidad Techo	Metavolcánico	50	70	0,028	17	2,338	0,0026	6475	0,25
	Metavolcánico argilizado	42	60	0,028	17	1,702	0,001	3268	0,26
	Filita	32	30	0,027	11	0,74	0,00031	743	0,28
	Mineral	48	70	0,029	13	1,651	0,00205	5692	0,26
Prosperidad 1	Metavolcánico	54	80	0,028	19	3,062	0,00419	9457	0,24
	Metavolcánico argilizado	46	65	0,028	17	1,994	0,00161	4632	0,26
	Filita	34	30	0,027	11	0,802	0,00039	842	0,28
	Mineral	50	75	0,029	13	1,788	0,0026	6938	0,25
Andaychagua	Metavolcánico argilizado	45	60	0,028	17	1,917	0,00143	4000	0,26
	Filita foliada	24	25	0,027	10	0,49	0,00012	396	0,3
	Mineral	32	30	0,029	11	0,74	0,00031	849	0,28
Andaychagua 1	Metavolcánico	56	85	0,028	19	3,315	0,00531	11270	0,24
	Metavolcánico argilizado	45	60	0,027	17	1,917	0,00143	4000	0,26
	Mineral	54	80	0,029	13	2,095	0,00419	9457	0,24
Salvadora	Metavolcánico competente	52	50	0,028	15	2,701	0,00483	6916	0,33
	Metavolcánico	42	40	0,028	15	1,89	0,00159	2927	0,34
	Metavolcánico argilizado	35	30	0,028	15	1,472	0,00073	1361	0,35
	Mineral competente	57	70	0,034	13	2,799	0,00841	12663	0,33
	Mineral	47	50	0,034	13	1,958	0,00277	4076	0,34
	Mineral argilizado	35	40	0,034	13	1,276	0,00073	1815	0,35
	Filita silicificada	46	40	0,0278	9	1,308	0,00249	5253	0,34
	Filita	34	20	0,0278	9	0,852	0,00065	1166	0,35
	Filita foliada	25	15	0,0278	9	0,618	0,00024	494	0,38

Nota. Elaboración propia.

Se utilizaron datos de zonificación geomecánica para el GSI, así como los resultados previos de campo y laboratorios realizados para determinar el UCS y mi, además de la aplicación de las guías de selección Hoek y Diederichs (2006) para la obtención del MR.

2.3.4. Caracterización de los estudios hidrogeológicos de las muestras del proyecto

Para una evaluación y caracterización los estudios hidrogeológicos de las unidades mineras subterráneas ubicadas en la sierra central del Perú en lo que respecta a los componentes fisicoquímicos de las aguas subterráneas, se tomará en cuenta los siguientes parámetros

a) pH

El pH es una de las pruebas más comunes para conocer parte de la calidad del agua. El pH indica la acidez o alcalinidad en este caso del agua, pero es en realidad una medida de la actividad del potencial de iones de hidrógeno (H+). Las mediciones de pH se ejecutan en una escala de 0 a 14, siendo así considerado neutro, aquellas que alcancen un valor igual a 7,0, acidas las que tengan valores menores de 7,0 y alcalinas aquellas que presenten un valor por encima de 7,0, (ANA, 2019), en la Tabla 31 se muestra la clasificación del pH.

Tabla 31

Clasificación del agua según el pH

pH	CLASIFICACIÓN
pH = 7	Neutra
pH < 7	Agua ácida
pH > 7	Agua alcalina

Nota. Elaboración propia.

b) Conductividad Eléctrica

La medición de la conductividad eléctrica es un método fiable, rápido, y que permite relevar fácilmente desde la superficie del suelo, la profundidad a la que se encuentran capas de distinta conductividad (Corwin & Lesch, 2010; Moral et al., 2010). Es la habilidad de un material para conducir una corriente eléctrica, al ser medida directamente del suelo mediante métodos geofísicos, se denomina conductividad eléctrica aparente (CEa), a diferencia de la que se mide, por ejemplo, a partir del extracto de saturación (CEe) (Rhoades et al., 1999).

La conductividad eléctrica (C.E) es la propiedad que tiene el agua de conducir la corriente eléctrica. Depende de varios factores, principalmente de la concentración y tipo de sales ionizables disueltas, naturaleza, carga de iones formados y de la temperatura. (ANA, 2018), en la Tabla 32 se evidencia la clasificación por conductividad eléctrica.

Tabla 32

Clasificación de masa de agua en función de la Conductividad eléctrica

AGUAS DULCES			AGUAS SALOBRES	AGUAS SALADAS
Mineralización baja	Mineralización media	Mineralización alta	Mineralización muy alta	-
0,1 - 0,25 dS/m	0,25 - 0,75 dS/m	0,75 - 2,0 dS/m	2,0 - 7,0 dS/m	7,0 dS/m

Nota. Elaboración propia.

c) Sólidos Totales Disueltos

La caracterización de las aguas de acuerdo a su salinidad está basada en la concentración de los Sólidos Disueltos Totales (SDT). El total de sólidos disueltos (a menudo abreviado como TDS, del inglés: Total Dissolved Solids) es una medida del contenido combinado de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido en forma molecular, ionizada o en forma de suspensión micro - granular (sol

coloide) (ANA, 2018). En la Tabla 33 se muestra la clasificación según la concentración de sólidos disueltos.

Tabla 33

Clasificación de las aguas según la concentración de Sólidos Disueltos Totales

AGUA DULCE	AGUA SALOBRE	AGUA SALINA	AGUA HIPERSALINA	SALMUERA
0-1500 ppm	1500-10000 ppm	10000-34000 ppm	34000-36000 ppm	36000-70000 ppm

Nota. Elaboración propia.

2.3.5. Aplicación del *Shotcrete*

Como es sabido, el uso de *shotcrete* en minería es una técnica imprescindible para el sostenimiento en excavaciones mineras, especialmente en unidades mineras que explotan mineral en sistemas subterráneos; este procedimiento consiste en inyectar neumáticamente y a alta presión una mezcla de concreto sobre una superficie de roca o terreno natural, mampostería, acero o madera. Esta aplicación usada como método de sostenimiento debe asociarse a un acelerante químico para garantizar un óptimo fraguado en las condiciones de confinamiento que tienen las labores mineras subterráneas.

La técnica de *shotcrete* en minería supone una solución eficaz a proyecto de tonelería en general, gracias a su resistencia y adherencia, es imprescindible en proyectos mineros donde la cohesión del macizo rocoso es débil para garantizar la sostenibilidad de cimentaciones profundas, estabilización de taludes, infraestructuras permanentes y de comunicación en las unidades mineras subterráneas.

El *shotcrete* es un material diseñado con comportamiento anisotrópico, no homogéneo y elástico-plástico. Por lo tanto, la comprensión del comportamiento completo de tensión-deformación del *shotcrete* es extremadamente importante en el diseño de soporte de terrenos, especialmente en excavaciones mineras. Esto tomando en cuenta que una masa rocosa es naturalmente discontinua, no homogénea, anisotrópica y no elástica y que cuando se deforma de manera no lineal, el *shotcrete* también responde

de manera no lineal. Las propiedades físicas y mecánicas más importantes del *shotcrete* reforzado con fibra de acero han sido estudiadas. La mayoría de los experimentos se han centrado en las influencias de los materiales constituyentes, como los tipos y dosis de fibra, cemento, agregado, aditivos y mezclas sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto/*shotcrete* reforzado con fibra (Saw et al., 2013).

Las técnicas de aplicación de *shotcrete* en minería subterránea que se emplean son dos, el *shotcrete* con técnica seca permite mezclar los materiales en seco y se impulsan a presión hasta una boquilla donde se dosifica el agua y el *shotcrete* con técnica húmeda, en la que el agua se dosifica antes de entrar por la manguera. Para ambas prácticas se usa, maquinarias convencionales como las alivas para labores subterráneas de secciones pequeñas, y robots lanzadores para labores mineras en sistemas de explotación mecanizada. Ver figuras 15 y 16.

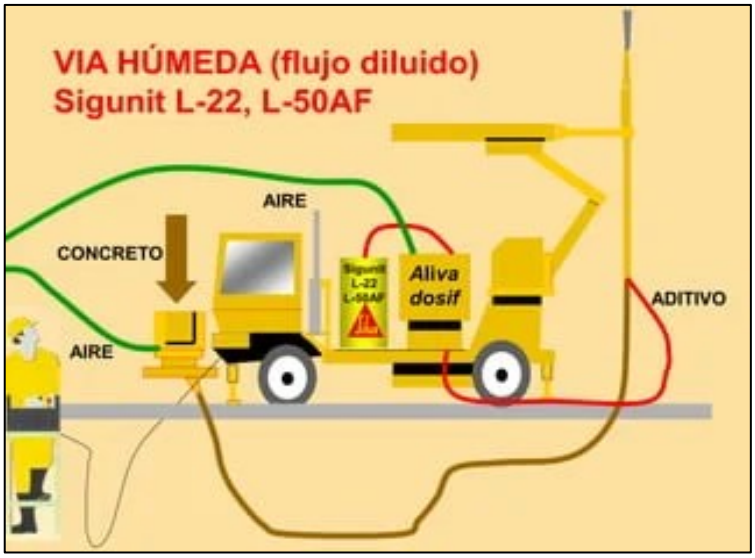
Figura 15

Flowsheet de lanzado de shotcrete vía seca

Nota. Manual de concreto lanzado (SIKA, 2021).

Figura 16

Flowsheet de lanzado de shotcrete vía húmeda



Nota. Manual de concreto lanzado (SIKA, 2021).

En el caso concreto de las 5 unidades mineras materia del presente estudio el uso de *shotcrete* es usado de acuerdo a la evaluación geomecánica correspondiente a cada una de ella siendo el índice RQD el determinante para dosificar las mezclas del hormigón que se utiliza para el sostenimiento, en virtud de ello es que la dosificación del *shotcrete* es un parámetro fundamental a ser considerado a la hora de valorar los resultados de la investigación.

Así también, la influencia de las aguas residuales del lanzado de *shotcrete* depende en gran medida de las características físico químicas de estas aguas y de las características hidrogeológicas del sitio. Factores como la porosidad influyen en las tasas de recarga de los acuíferos en función de las condiciones climáticas, así como el tiempo de filtrado de las aguas residuales. A medida que se filtran las aguas residuales provenientes del *shotcrete*, la reacción geoquímica puede generar diferentes compuestos finales (De Belie, et al., 2002). Sin embargo, debido a la naturaleza heterogénea de estas filtraciones, la conductividad hidráulica y las zonas de flujo preferencial pueden causar variaciones en los tiempos de filtración, afectando la composición final del agua resultante (Huisamen & Wokersdorfer, 2016).

a) Dosificación de *shotcrete*

Para la preparación de la mezcla del hormigón tanto en vía seca como en vía húmeda se recomienda emplear una planta con mezcladora, a ser posible de eje vertical, ya que las exigencias técnicas las características de sostenimiento obligan a una preparación mezcla de los componentes homogéneos sobre todo con la incorporación de adiciones y aditivos fundamentales en la tecnología del hormigón proyectado, para realizar una mezcla optima se deben de considerar los porcentajes y parámetros para la dosificación, los cuales se muestran en la Tabla 34 y Tabla 35.

Tabla 34

Parámetros y porcentaje de dosificación de shotcrete en las Unidades Mineras

	Und	Mina Carahuacra	Mina San Cristóbal	Mina Andaychagua	Mina El Porvenir	Mina Atacocha
Arena	kg	1610	1610	1612	1500	1400
Cemento	kg	400	400	395	440	460
Agua	L	185	185	179	176	180
Fibra Metalica	kg	20	20	20	-	
Fibra Sintetica	kg	5	5	-	5	8
Viscocrete (plastificante)	L	5	5	2.7	-	
Sigunit (acelerante)	L	26	26	18	-	
Mastersetroc SA160 (Acelerante)	L	-	-	-	30,5	30,8
Masterset delvo- (retardarte)	L	-	-	-	2	3
Activador delvo	L	1	1	-	-	-
Master Glenium	kg	3	3	-	-	-
Total	kg/m3	2245	2245	2236	2153	2081

Nota. Elaboración propia.

Tabla 35

Porcentajes de dosificación de shotcrete en las Unidades Mineras

Unidad Minera	Dosificación de la Mezcla de *shotcrete* en medio Acuosos									
	Arena	Cemento	Agua	Fibra Metálica	Fibra Sintética	Plastificante	Acelerante	Activador DELVO	Master Glenium	Total de Kg
	% suma de columnas	% suma de columnas	% suma de columnas	% suma de columnas	% suma de columnas	% suma de columnas	% suma de columnas	% suma de columnas	% suma de columnas	% suma de columnas
Andaychagua	20,8 %	18,9 %	19,8 %	17,9 %	37,04 %	21,26 %	13,68 %	-	-	20,4 %
Atacocha	18,1 %	22,0 %	19,9 %	7,1 %	14,81 %	-	23,40 %	42,86 %	-	18,99 %
Carahuacra	20,8 %	19,1 %	20,4 %	35,7 %	18,52 %	39,37 %	19,76 %	14,86 %	50,0 %	20,48 %
El Porvenir Milpo	19,4 %	21,0 %	19,4 %	3,6 %	11,11 %	-	23,40 %	28,57 %	-	19,65 %
San Cristóbal	20,8 %	19,1 %	20,4 %	35,7 %	18,52 %	39,37 %	19,76 %	14,29 %	50,0 %	20,48 %
Total	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Nota. Elaboración propia.

b) Porcentaje de rebote por mixer

La aplicación del *shotcrete* por medios neumáticos implica el rebote de la mezcla al ser proyectado sobre la superficie que se desea sostener causando una pérdida de material y ralentizar la continuidad óptima de los siguientes trabajos como consecuencia de la limpieza, algunos de los factores que intervienen en el aumento del porcentaje de rebote son: mayor dureza de la mezcla, aplicación antes de la consolidación de la capa de amortiguación, así como la técnica correcta de aplicación.

En la Tabla 36 y Tabla 37 se muestra un resumen del porcentaje de rebote en cada unidad minera.

Tabla 36

Parámetros y Porcentaje de Rebote por Mixer en las Unidades Mineras

Rebote	Und	Cantidad por Unidad Minera				
		Mina Carahuacra	Mina San Cristóbal	Mina Andaychagua	Mina El Porvenir	Mina Atacocha
Peso Total de Rebote	Kg	224,5	224,5	781,8	608,90	–
Peso Total del Desprendimiento	Kg	224,5	224,5	781,8	608,90	–
Peso por m3	Kg	–	–	–	2 153,8	–
Peso Total por m3 de Carga de Mixer	Kg	–	–	3,7	–	–
Peso Total de Carga de Mixer	Kg	–	–	8 273,2	–	–
Peso Aprox. Sobrante en la Tina y Boa del Robot	Kg	–	–	58	–	–
Peso Aprox. Sobrante en el Mixer	Kg	–	–	15	–	–
Peso Neto del Concreto Antes del Lanzado	Kg	2 245	2 245	8 199,9	–	–
Porcentaje de Rebote	%	10	10	9,5	19,1	–

Nota. Elaboración propia.

La aplicación del *shotcrete* influye en el rebote través de varios factores. Un espesor suficiente y buena adherencia influyen en las fallas y los daños en el *shotcrete*, mayormente debido a pequeños desprendimientos en áreas con capas delgadas menores a 20 mm y baja adherencia. La contracción libre del *shotcrete*, que después de 90 días oscila entre 0,4‰ y 1,0‰, produce áreas sin contacto entre el *shotcrete* y la pared, en tanto el curado es un factor significativo para mantener la unión. La resistencia de adherencia, correlacionada con la resistencia a compresión es significativamente mayor en superficies tratadas con chorro de agua a alta presión comparado con el escalado mecánico seguido de limpieza con agua a baja presión, indicando que la preparación de la superficie es otro factor influyente (Malmgren et al, 2005).

Tabla 37

Porcentaje de Rebote por Mixer en las Unidades Mineras

Descripción	Unidades Mineras					Total
	Andaychagua	Atacocha	Carahuacra	El Porvenir Milpo	San Cristóbal	
Peso por rebote	42,50 %	-	12,20 %	33,10 %	12,20 %	100 %
Peso por Desprendimiento	42,50 %	-	12,20 %	33,10 %	12,20 %	100 %
Peso Neto antes Lanzado	64,62 %	-	17,69 %	-	17,69 %	100 %

Nota. Elaboración propia.

c) Promedio de *shotcrete* lanzado por guardia

Los avances recientes en el diseño de revestimientos permanentes con *shotcrete*, particularmente aquellos que integran membranas impermeabilizantes aplicadas por pulverización, han permitido una carga compartida más eficiente entre los revestimientos primario y secundario, ofreciendo así un diseño más delgado y económico. No obstante existen desafíos y las pruebas realizadas para mejorar la unión y la resistencia entre las capas de hormigón y las membranas, con el objetivo de optimizar aún más las propiedades del revestimiento (Pickett & Thomas, 2015).

La elección del equipo adecuado para el lanzado de *shotcrete* garantiza una mayor precisión en cuanto a la efectividad de la aplicación obteniendo un menor porcentaje de pérdida en el rebote, una técnica correcta de lanzado involucra la contemplación de ciertas especificaciones que se deben de contemplar al mejorar la adherencia del *shotcrete* y un avance óptimo en las labores subterráneas, a continuación, se muestra el consumo de *shotcrete* durante cada guardia, por día y mensual en la Tabla 38 y Tabla 39.

Tabla 38

Consumo promedio de shotcrete por las Unidades Mineras

Descripción	Und	Cantidad por Unidad Minera				
		Mina Carahuacra	Mina San Cristóbal	Mina Andaychagua	Mina El Porvenir	Mina Atacocha
Consumo promedio de *shotcrete* mensual	m^3	2203,27	3383,73	–	–	–
Consumo promedio de *shotcrete* por día	m^3	73,44	112,79	–	–	–
Consumo promedio de *shotcrete* por guardia	m^3	36,72	56,40	–	–	–

Nota. Elaboración propia.

Tabla 39

Porcentaje del consumo promedio de shotcrete por las Unidades Mineras

Descripción	Unidades Mineras					Total
	Andaychagua	Atacocha	Agua	El Porvenir Milpo	San Cristóbal	
Consumo promedio de *shotcrete* mensual	-	-	39,44	-	60,56	100 %
Consumo promedio de *shotcrete* por día	-	-	39,44	-	60,56	100 %
Consumo promedio de *shotcrete* por guardia	-	-	39,43	-	60,57	100 %

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO III

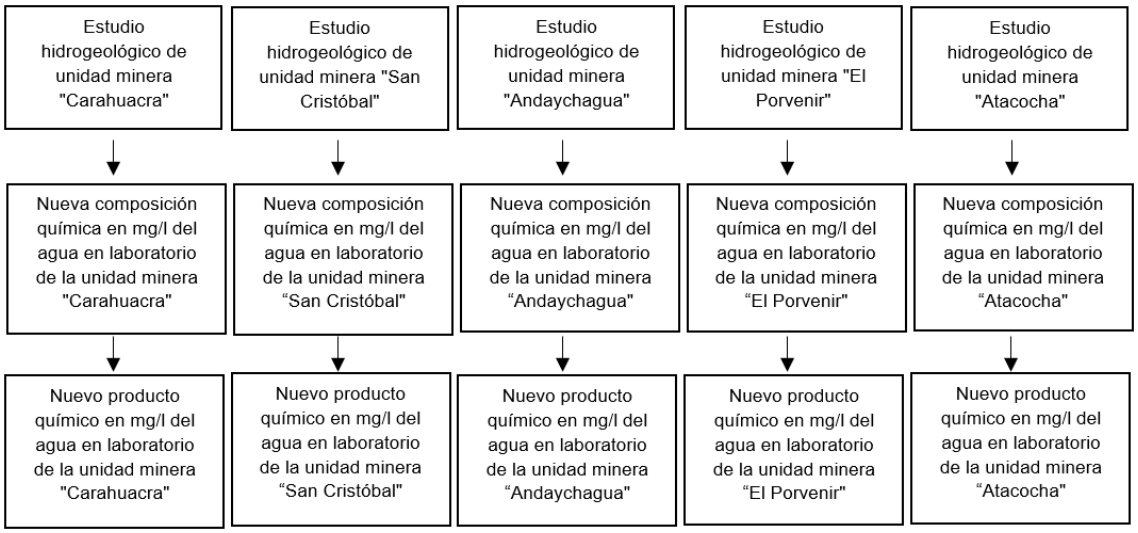
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Caracterización, nivel y tipo del diseño de investigación

Pre experimental

Figura 17

Esquema del diseño de investigación Pre experimental



Nota. Elaboración propia.

3.2. Población y/o muestra de estudio

3.2.1. Población

Se tomarán datos acerca de las características de las aguas residuales de 5 estudios hidrogeológicos que se tiene de unidades mineras ubicadas en el centro del país; de allí se conocerá toda la información relacionada a las características fisicoquímicas de la calidad del agua en la zona preexistente, ya que dichos valores se encuentran valorados en cada uno de los estudios realizados para cada unidad minera.

3.2.2. Muestra

En una unidad de volumen (1l) de agua se recreará las condiciones fisicoquímicas de la calidad de agua subterránea, a la que se añadirá una cantidad de *shotcrete* en medio acuoso equivalente al 25 % del volumen total a analizar. Este análisis se llevará a cabo en un laboratorio físico químico certificado, con la finalidad de recrear los nuevos compuestos químicos que se generan, de tal forma que se podrá caracterizar la calidad de agua que se infiltra en los acuíferos confinados. Es importante remarcar que serán 5 repeticiones de análisis en laboratorio ya que se tiene que recrear dichas la calidad de agua residual para diferentes unidades mineras ubicadas en el centro del país.

3.3. Recopilación de Datos

Al ser este un diseño experimental se ha utilizado para obtener mediciones de las variables que sirven para establecer el comportamiento del agua subterránea una vez haya sido mezclada con otra sustancia como es el *shotcrete* para así poder corroborar o descartar la hipótesis planteada.

Por tal motivo a continuación se presenta el análisis de los datos a utilizar, que son relevantes para obtener los resultados de la investigación

3.3.1. Parámetros Físico Químicos de las Aguas Subterráneas.

Para la evaluación e interpretación de los estudios hidrogeológicos de las Unidades Mineras, en lo que respecta a la caracterización de los componentes fisicoquímicos de las aguas subterráneas se realizó la revisión y análisis de la información proporcionada por el responsable del proyecto, así como la revisión de estudios similares publicados por páginas oficiales en la web.

3.3.1.1. Mina Carahuacra

pH

Según los datos reportados en la siguiente Tabla 40 y Tabla 41 se puede observar que, del 50 a 70 % de los valores de pH de las zonas muestreadas, muestran aguas con ligera y marcada alcalinidad ya que se encuentran con valores que oscilan entre 7,1 a 8,3. Así mismo, el otro 30 a 50 % de las zonas presentan pH que califican a sus aguas como ácidas a muy ácidas.

Conductividad Eléctrica

Según los resultados en la Tabla 40, se tiene que las aguas que corresponde al código CA 705-FI-01, GL 070-FI-19, BP 436-FI-01 y BP 700-TL-01 se clasificarían según su conductividad eléctrica, como aguas dulces de mineralización alta, así mismo todas las otras zonas muestreadas se calificarían como aguas salobres de mineralización muy alta ya que presentan valores que oscilan desde los 2317,0 a 3582,0 uS/cm.

Con respecto a los valores reportados en la Tabla 41 (segundo muestreo), se observa que aquellos con código CA 705-FI-01, GL-070-FI-19, CA 823-TL01, AC 677-TL-05 y BP 700-TL-02 serían consideradas aguas dulces de mineralización alta a diferencia de las aguas que corresponden a todo el resto de zonas muestreadas, que serían consideradas como aguas salobres de mineralización muy alta a excepción de las aguas muestreada en las zonas con código AC 523-FI-03 y AC 160-FI-01 que serían clasificadas como aguas saladas por presentar valores (7 704,0 y 2 8610,0) por encima de los 7 000 uS/cm.

Sólidos Totales Disueltos

Con respecto a este parámetro podemos ver que aproximadamente entre un 36 a 38 % de las muestras reportadas en la Tabla 40 y Tabla 41 respectivamente, serían clasificadas como aguas dulces (BP 436-FI-01, CA 823-TL-01, AC 677-TL-05, BP 700-TL-02) en al menos uno de los muestreos realizados ya que aquellas muestras con los

códigos BP 700-TL-01, CA 705- FI-01 y GL 070-FI-19 serían categorizadas como aguas dulces en ambos muestreos.

Asimismo, podemos observar también en la Tabla 40, que aproximadamente el 64 % de las zonas muestreadas sus aguas serían de tipo salobre. De igual manera en la Tabla 41, el 56 % de las zonas muestreadas serían también aguas de tipo salobre y solo un 6 % se calificaría como agua de tipo salina.

Elementos Mayoritarios

Con respecto a los elementos mayoritarios registrados en las aguas subterráneas que figuran en la Tabla 40, podemos observar que el 100 % de las zonas muestreadas presentan agua de tipo cálcicas sulfatadas ya que, en todas ellas, los elementos que se encuentran en mayor concentración son el calcio para los cationes y el sulfato para los aniones.

Por otro lado, en lo que respecta a las muestras que figuran en la Tabla 41, encontramos 3 tipos de aguas basadas en las concentraciones de sus elementos mayoritarios, es así que un 6 % (AC 677-TL-05) de las muestras de aguas son aguas de tipo sódica bicarbonatada, un 12.5 % (AC 523-FI-03 y AC 160-FI-01) son aguas de tipo magnésicas sulfatadas y aproximadamente en el 87,5 % de las muestras predominan las aguas de tipo cálcicas sulfatadas.

Elementos Minoritarios

En cuanto a los registros de elementos minoritarios que figuran en la Tabla 40 y 41, podemos observar que el magnesio es el elemento que se encuentra en mayor cantidad con respecto a los demás cationes seguido del zinc.

Tabla 40

Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el primer muestreo (febrero) en el interior de la Mina Carahuacra

DATOS DE LAS MUESTRAS							PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS		ELEMENTOS MAYORITARIOS								ELEMENTOS MINORITARIOS				
		Coordenadas							Cationes				Aniones				Cationes				
N° de muestra	Clasificación	Este	Norte	Altitud	Tipo de fuente	Código de muestra	Conductividad Eléctrica CE (uS/cm)	pH	Sólidos Totales Disueltos STD (mg/L)	Calcio Ca mg/L	Magnesio Mg mg/L	Sodio Na mg/L	Potasio K mg/L	Bicarbonatos HCO3 mg/L	Carbonatos CO3 mg/L	Cloruros Cl mg/L	Sulfatos SO4 mg/L	Manganeso Mn mg/L	Hierro Fe mg/L	Zinc Zn mg/L	Aluminio Al mg/L	Cobre Cu mg/L
1	Agua subterránea	381068	8707754	820	Canal	MA-04	2789,0	3.8	2682,0	330,07	71,15	8,52	9,14	0,5	0,50	30,77	2054,89	89,28	0,34	80,16	4,788	3,4814
2	Agua subterránea	383143	8704122	970	Filtración	CA 705-FI-01	849,8	8,0	694,0	107,55	42,77	0,46	1,41	220,9	1,90	7,47	267,52	0,10	0,01	0,01	0,00095	0,00005
3	Agua subterránea	383407	8703953	870	Taladro	CA 944-TL-01	3582,0	6,0	2398,0	441,46	103,84	19,42	8,03	35.1	0,50	29,80	1606,10	111,44	26,48	25,70	0,0095	0,0011
4	Agua subterránea	383323	8704149	970	Cámara	NV 970-CB-01	2591,0	7.2	2406,0	420,86	79,06	24,11	14,41	80,6	0,50	6,47	1454,94	36,55	0,03	53,68	0,0077	0,0006
5	Agua subterránea	383105	8703974	1070	Taladro	CA 604-TL-12	2236,0	7.4	2060,0	483,22	40,32	3,72	3,12	113,4	0,50	3,69	1194,50	0,93	0,04	0,04	0,0019	0,0002
6	Agua subterránea	383027	8704171	1180	Filtración	BP 3850-FI-17	2529,0	7.7	2376,0	548,4	42,69	11,36	5,74	95,3	0,50	4,18	1426,13	1,82	0,00	0,13	0,0302	0,0002
7	Agua subterránea	383090	8704151	1220	Taladro	CA 093-TL-13	2317,0	8,0	2032,0	394,45	53,11	58,42	13,38	101,6	0,50	3,40	1239,25	1,31	0,01	0,25	0,0054	0,0002
8	Agua subterránea	383045	8704082	1070	Filtración	GL 070-FI-19	1530,0	7.9	1238,0	286,97	36,05	2,54	3,49	154,6	0,50	2,08	715,32	0,73	0,00	0,01	0,00095	0,0001
9	Agua subterránea	383157	8703976	1120	Filtración	AC 117-FI-20	3125,0	3.6	3116,0	402,67	102,52	6,48	5,83	0,5	0,50	4,68	1902,39	75,28	5,60	129,13	3,2005	0,217

10	Agua subterránea	383417	8704579	1180	Filtración	BP 436-FI-01	985,6	8,0	888,0	80,93	25,09	70,97	16,39	219,1	1,20	2,81	271,40	0,03	0,01	1,75	0,0042	0,0004
11	Agua subterránea	382970	8704245	1020	Taladro	BP 700-TL-01	1417,0	7.7	1052,0	235,69	26,67	1,84	2,86	149,9	1,00	8,02	607,99	0,52	0,00	0,00	0,00095	0,00005

Nota. Elaboración propia.

Tabla 41

Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el segundo muestreo (abril) en el interior de la Mina Carahuacra

DATOS DE LAS MUESTRAS							PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS			ELEMENTOS MAYORITARIOS									ELEMENTOS MINORITARIOS				
		Coordenadas								Cationes				Aniones					Cationes				
N° de muestra	Clasificación	Este	Norte	Altitud	Tipo de fuente	Código de muestra	Conductividad Eléctrica CE (uS/cm)	pH	Sólidos Totales Disueltos STD (mg/L)	Calcio Ca mg/L	Magnesio Mg mg/L	Sodio Na mg/L	Potasio K mg/L	Bicarbonatos HCO3 mg/L	Carbonatos CO3 mg/L	Cloruros Cl mg/L	Sulfatos SO4 mg/L	Manganeso Mn mg/L	Hierro Fe mg/L	Zinc Zn mg/L	Aluminio Al mg/L	Cobre Cu mg/L
1	Agua subterránea	383334	8704187	820	Cámara	CA-CB-01	3852,0	5,9	2952	436,47	101,73	15,60	10,52	18,2	0,50	4,9	1799,08	60,47	0,01	99,7081	0,0198	0,0468
2	Agua subterránea	381068	8707754	820	Canal	MA-04	4679,0	3,3	3156	400,34	102,04	8,98	8,81	0,5	0,50	2,2	1932,67	138,83	4,6665	154,01	8,9005	5.1638
3	Agua subterránea	383407	8703953	870	Taladro	CA 944-TL-01	5381,0	5,9	3900	611,96	137,58	22,31	9,74	16,4	0,50	2,7	2733,57	140,14	8,49	15,1205	0,00095	0,0001
4	Agua subterránea	383143	8704122	970	Filtración	CA 705-FI-01	911,8	7,5	740	134,43	47,21	0,66	1,46	232,4	0,50	0,9	281,34	0,00	0,0016	0,0377	0,00095	0,0013
5	Agua subterránea	382970	8704245	1020	Taladro	BP 700-TL-01	1487,0	7,3	1014	230,84	23,37	1,81	2,72	149,8	0,50	0,3	568	0,47	0,01	0,0001	0,00095	0,00005
6	Agua subterránea	383045	8704082	1070	Filtración	GL 070-FI-19	1195,2	7,7	796	165,52	31,78	1,24	2,82	202,8	1,50	0,7	343,73	0,67	0,01	0,031	0,0043	0,0002

7	Agua subterránea	383157	8703976	1120	Filtración	AC 117-FI-20	3947,0	3,5	2922	435,69	121,32	4,74	3,85	0,5	0,50	3,4	1864,37	54,34	5,26	38,7657	1,0513	0,0464
8	Agua subterránea	383600	8704595	1180	Filtración	AC 523-FI-03	7704,0	3,2	5762	549,95	336,56	64,12	68,29	0,5	0,50	13,5	3340,86	97,7	14,25	236,7511	1,3708	0,0159
9	Agua subterránea	383041	8703866	1070	Taladro	CA 823-TL-01	863,8	7,5	672	125,14	42,82	0,47	1,24	195,3	0,50	0,5	284,26	0,35	0,01	0,0053	0,00095	0,00005
10	Agua subterránea	383090	8704151	1220	Taladro	CA 093-TL-13	3175,0	7,2	2148	399,18	49,78	62,83	12,17	98,6	0,50	3,0	1441,42	1,43	0,01	0,1888	0,00095	0,00005
11	Agua subterránea	383198	8704356	1220	Filtración	AC 160-FI-01	28610,0	3,0	20880	482,12	748,06	32,53	10,89	0,5	0,50	10,0	13984,64	646,41	980,02	3446,4114	43,5464	0,2768
12	Agua subterránea	383015	8704247	1070	Taladro	AC 542-TL-02	3352,0	7,3	2372	489,29	52,90	4,14	5,38	120,9	0,50	0,7	1570,37	1,30	0,01	0,024	0,00095	0,00005
13	Agua subterránea	383763	8704529	1120	Taladro	AC 677-TL-05	844,0	8,3	506	6,22	4,20	165,64	11,04	369,8	6,50	9,81	58,75	0,01	0,000	0,0088	0,00095	0,0016
14	Agua subterránea	383369	8704083	1120	Filtración	XC 304-FI-01	2422,0	7,0	2386	500,51	72,16	5,03	4,36	34,6	0,50	1,42	1754,52	23,17	0,01	14,5056	0,004	0,0068
15	Agua subterránea	382879	8704220	1020	Taladro	BP 700-TL-02	1602,0	7,2	1432	353,05	40,22	5,72	3,50	153,8	0,50	1,01	941,78	1,35	5,05	0,058	0,0057	0,0002
16	Agua subterránea	383105	8703974	1070	Taladro	CA 604-TL-12	2096,0	7,1	2006	490,87	41,79	4,20	3,01	110,5	0,50	0,51	1382,52	0,96	0,06	0,0081	0,0044	0,00005

Nota. Elaboración propia.

3.3.1.2. Mina Atacocha

pH

Según los datos reportados en la Tabla 42, observamos que en dos de las zonas muestreadas (AVAT-08 y AVAT-10) sus valores de pH nos indican que son aguas de tipo ácidas muy propensas a la neutralidad por presentar valore muy cercanos al 7. Por otro lado, observamos también que el resto de las muestras reportan valores de pH que oscilan entre 7.8 a 12.6, lo que nos señala que sus aguas tienen la característica de ser alcalinas.

Conductividad Eléctrica

Vistos los resultados en la Tabla 42, se tiene que en dos de las zonas muestreadas las aguas según su conductividad eléctrica son aguas de tipo salobre. Se visualiza también que en las zonas restantes todas presentan aguas de tipo dulce. De ellas, las zonas con códigos AVAT-08, PZ-05, PB-03 y AVAT-10 tienen la particularidad de ser de mineralización alta y las zonas con códigos UW-02, UW-01 y AVAT-07 de ser de mineralización media.

Sólidos Totales Disueltos

Con respecto al contenido de sólidos totales disueltos en las muestras de aguas subterráneas reportadas en la Tabla 42, vemos que las muestras de aguas de las diferentes zonas son aguas dulces a excepción de la zona con código AVAT-07, que presenta agua de tipo salobre, por presentan un valor de sólidos totales disueltos de 2071,91mg/L.

Elementos Mayoritarios

Con respecto a los elementos mayoritarios registrados en las aguas subterráneas que se reportan en la Tabla 42, podemos agruparlas en dos grupos. El primer grupo estaría formado por aguas de tipo cálcicas bicarbonatadas, donde estarían consideradas las zonas con códigos AVAT-08, UW-01, PZ-05, PB-03, AVAT-07 y AVAT-12. El segundo grupo

estaría formado por aguas de tipo cálcicas sulfatadas, las que estarían en las zonas con códigos UW-02, AVAT-09 y AVAT-10.

Elementos Minoritarios

Con respecto a estos elementos en las aguas subterráneas reportado en la Tabla 42, podemos mencionar que los elementos encontrados en mayor concentración son el hierro y el manganeso.

Tabla 42

Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el interior de la mina Atacocha

DATOS DE LAS MUESTRAS							PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS		ELEMENTOS MAYORITARIOS									ELEMENTOS MINORITARIOS				
		Coordenadas							Cationes				Aniones					Cationes				
N° muestra	Clasificación	Este	Norte	Altitud	Tipo de fuente	Código de muestra	Conductividad Eléctrica CE (uS/cm)	pH	Sólidos Totales Disueltos STD (mg/L)	Calcio Ca mg/L	Magnesio Mg mg/L	Sodio Na mg/L	Potasio K mg/L	Bicarbonatos HCO3 mg/L	Carbonatos CO3 mg/L	Cloruros Cl mg/L	Sulfatos SO4 mg/L	Manganeso Mn mg/L	Hierro Fe mg/L	Zinc Zn mg/L	Aluminio Al mg/L	Cobre Cu mg/L
1	Agua subterránea	366682	8830275	4162	Piezómetro ubicado en la quebrada La Laquia	AVAT-08	797,0	6,06	518.33	65.85	36.98	0,4	1.38	222.4	3.6	0,05	66.1	0	0,0016	0,022	0,00095	0,0001
2	Agua subterránea	367249	8831688	4134	Piezómetro ubicado aguas arriba del depósito de relaves Atacocha	UW-02	506.9	7.84	329.44	104.8	16.59	1,065	1.86	16.3	0,50	4.958	344.9	25.37	31.93	4.66	15.38	0,00556

3	Agua subterránea	367236	8830429	4014	Piezómetro ubicado aguas abajo del depósito de relaves Atacocha	UW-01	362.2	7.94	235.73	50,63	29.82	0,23	1.25	188.7	1.1	0,05	66.3	0,01	0,0016	0,0296	0,00095	0,00005
4	Agua subterránea	367127	8830627	4020	Piezómetro ubicado aguas abajo del depósito de relaves Atacocha	PZ-05	1476.3	7.68	959.81	180,2	27.37	4.384	4,03	261	0,50	3.404	284.1	1.43	8.464	0,69	1.436	0,00895
5	Agua subterránea	367530	8831472	4222	Piezómetro ubicado en la margen izquierda quebrada Atacocha	PB-03	933.8	7.8	606.13	82.13	1.556	1.800	1.18	202.1	1.10	4.14	4.91	0,0009	4.418	0,26	2.222	0,0041

6	Agua subterránea	366565	8831143	4160	Piezómetro ubicado en la margen derecha del depósito de relaves Atacocha	AVAT-07	433.8	8,02	282,03	72.3	17.66	1.19	0,61	225.9	1.11	0,408	37.5	0,23823	3.222	0,13	0,297	0,00451
7	Agua subterránea	367472	8830319	3969	Piezómetro ubicado en la quebrada Atacocha	AVAT-09	3186.4	7.87	2071.91	268.3	77.36	319.9	7.36	179.8	0,50	476.7	856.9	0,5169	5.172	0,29	1.373	0,01499
8	Agua subterránea	368096	8830273	3900	Piezómetro ubicado en la quebrada Atacocha, aguas debajo de AVAT-09	AVAT-10	929.8	6.7	603.82	489.29	52.90	4.14	5.38	120,9	0,50	0,7	1570,37	1.30	0,01	0,024	0,00095	0,00005

9	Agua subterránea	368235	8829681	4069	Piezómetro ubicado en quebrada sin nombre, cuyas aguas confluyen en en la quebrada Atacocha	AVA-12	2198.8	12.61	1428.73	163.7	0,425	31.89	8.26	188.7	3.50	0,684	13.82	0,0854	0,597	0,13	1,013	0,01525

Nota. Elaboración propia.

3.3.1.3. Mina Andaychagua

Como resultado de los análisis se obtuvieron los siguientes parámetros:

pH

Al observar los datos de pH que se reportan en las Tabla 43, visualizamos que solo en dos zonas muestreadas (AND-IM-13P, AND-IM-03V) las aguas presentan ligera acidez ya que en el resto de las zonas las aguas se encuentran con el calificativo de alcalinas por presentar valores en un rango de 7,2 a 8,2. Con respecto a la Tabla 44, observamos que el 100 % de las muestras de aguas son aguas alcalinas ya que reportan valores de pH que oscilan entre 7,6 a 9,87.

Conductividad Eléctrica

Según los resultados en la Tabla 44, se tiene que a excepción del agua que se encuentra en la zona con código AND-IM-06F (agua salobre) todas son calificadas según su conductividad eléctrica como aguas dulces. De ellas tenemos que las que presentan los códigos AND-IM-08Fr y AND-IM-03V serian aguas dulces de mineralización media y aquellas con código AND-IM04P,AND-IM-13P y AND-IM-11Fr serían también aguas dulces pero de mineralización alta. Con respecto a los valores reportados en la Tabla 44, se observa que el 100 % de las muestras de aguas serán calificadas como aguas dulces. De ellas aproximadamente el 88 % serían de mineralización media y solo el 11:1 % sería de mineralización alta, por presentar un valor de conductividad eléctrica de 1423,0 US/cm.

Sólidos Totales Disueltos

Con respecto al contenido de sólidos totales disueltos en las muestras de aguas reportadas en la Tabla 43, vemos que aproximadamente el 57 % de las muestras analizadas serían, según este parámetro, aguas dulces y el 43 % serían aguas de tipo salobre. Por otro lado, en la Tabla 44 observamos concentraciones de sólidos totales disueltos que oscilan entre 311 a 1093mg/L, rangos que ubican o clasifican a las al 100 % de las muestras en aguas dulces.

Elementos Mayoritarios

Con respecto a los elementos mayoritarios registrados en las aguas subterráneas tenemos en la Tabla 43, que el 86 % de las muestras tendrían la característica de ser aguas de tipo sulfatadas cálcicas y solo un 14 % de las muestras (AND-IM-03V) de aguas reportadas, sería un agua de tipo sulfatada cálcica y además bicarbonatada.

Así mismo, en la Tabla 44, observamos hasta tres tipos de aguas según la composición de sus elementos mayoritarios. Es así que las muestras con códigos MWH-AND-01-II, MWH-AND-06, MWH-AND-07-I y MWH-AND-07-II serían calificadas como aguas de tipo cálcicas sulfatadas. Por otro lado, las muestras con códigos MWH-AND-02-I, MWH-AND-03-I, MWH-AND-02-II y MWH-AND-03-II serían aguas cálcicas bicarbonatadas. Finalmente un tercer tipo de agua que lo presenta la muestra con código MWH-AND-01-I, calificada como un agua sódica sulfatada.

Elementos Minoritarios

Con respecto a la composición de estos elementos en las aguas subterráneas podemos resaltar que, el elemento que se encuentra en mayor concentración tanto en los datos reportados en la Tabla 43 y Tabla 44, es el hierro, con valores que oscilan entre 1,31 a 16,9 mg/L.

Tabla 43

Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el interior de la mina Andaychagua

DATOS DE LAS MUESTRAS							PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS			ELEMENTOS MAYORITARIOS										ELEMENTOS MINORITARIOS			
		Coordenadas								Cationes				Aniones						Cationes			
N° de muestra	Clasificación	Este	Norte	Altitud	Tipo de fuente	Código de muestra	Conductividad Eléctrica CE (uS/cm)	pH	Sólidos Totales Disueltos STD (mg/L)	Calcio Ca mg/L	Magnesio Mg mg/L	Sodio Na mg/L	Potasio K mg/L	Bicarbonatos HCO3 mg/L	Carbonatos CO3 mg/L	Cloruros Cl mg/L	Sulfatos SO4 mg/L	Manganeso Mn mg/L	Hierro Fe mg/L	Zinc Zn mg/L	Aluminio Al mg/L	Cobre Cu mg/L
1	Agua subterránea	389067	8701858	1000	Fractura	AND-IM-08Fr	733,0	8,23	555,0	107,1	21,835	4,46	3,075	130,17	0,17	0,19	303,10	1,011	1,201	0,03	0,001	0,00002
2	Agua subterránea	389154	8701920	1050	Perforación de sostenimiento	AND-IM-04P	876	7,23	680	132,9	22,77	6,95	5,739	125,42	0,17	0,809	395,6	0,2562	1,31	0,035	0,001	0,00002
3	Agua subterránea	388887	8701757	1050	Perforación	AND-IM-13P	1761	6,64	1520,0	279,5	37,04	26,12	32,06	71,49	0,17	0,378	1015	1,828	10,82	0,023	0,001	0,00002
4	Agua subterránea	389069	8701849	1100	Filtración	AND-IM-06F	2468,0	8,0	1506,0	297,4	43,47	30,52	31,99	68,2	0,17	0,70	1004	1,912	8,627	0,042	0,001	0,00002
5	Agua subterránea	388853	8701592	900	Fractura	AND-IM-03V	425,0	6,42	308,0	51,41	13,24	2,3	3,342	38,55	0,17	0,8661	54,09	0,5324	8,83	0,557	0,456	0,0958
6	Agua subterránea	389149	8701856	1050	Fractura	AND-IM-11Fr	785	7,5	640	124,1	20,61	6,53	6,352	112,73	0,17	0,742	344,4	0,237	1,443	0,015	0,001	0,00002
7	Agua subterránea	389522	8702288	1050	Filtración	AND-IM-14F	1862	7,6	1624	300,4	39,19	26,98	33,73	67,95	0,17	0,386	1128,0	1,658	7,012	0,015	0,0005	0,00002

Nota. Elaboración propia.

Tabla 44

Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en los piezómetros

DATOS DE LAS MUESTRAS							PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS		ELEMENTOS MAYORITARIOS								ELEMENTOS MINORITARIOS				
		Coordenadas							Cationes				Aniones				Cationes				
N° de muestra	Clasificación	Este	Norte	Altitud	Tipo de fuente	Código de muestra	Conductividad Eléctrica CE (uS/cm)	pH	Sólidos Totales Disueltos STD (mg/L)	Calcio Ca mg/L	Magnesio Mg mg/L	Sodio Na mg/L	Potasio K mg/L	Bicarbonatos HCO3 mg/L	Carbonatos CO3 mg/L	Cloruros Cl mg/L	Sulfatos SO4 mg/L	Manganeso Mn mg/L	Hierro Fe mg/L	Zinc Zn mg/L	Aluminio Al mg/L	Cobre Cu mg/L
1	Agua subterránea	392333	8700572	4265	Piezometro Relavera Andaychagua, Ubicado al Final de la Presa	MWH-AND-01-II	1423,0	7,66	1093,0	192,6	34.2	30,23	13,15	144,1	0,17	5,273	652,1	0,4955	12,44	1,075	3,83	0,0473
2	Agua subterránea	390996	8700732	4399	Relavera Andaychagua, Ubicado atrás de la Garita	MWH-AND-02-I	366	8,8	311,0	48,5	15.5	18,5	6,34	201,05	0,17	3,465	100,73	0,85	5,307	0,075	2,63	0,0136
3	Agua subterránea	390745	8701521	4418	Piezómetro Relavera Andaychagua, Margen Izquierda del Rio	MWH-AND-03-I	699,0	8,82	508,0	50,63	30	53,5	2,08	191,96	0,17	42,68	168,73	0,15	2,12	0,01	1,12	0,042
4	Agua subterránea	390996	8700732	4399	Relavera Andaychagua, Ubicado atrás de la Garita	MWH-AND-02-II	466,0	8,48	388,0	89,8	11,98	5,18	1,96	252,91	0,17	0,25	77,45	0,1897	5,834	0,059	2,13	0,0319

5	Agua subterránea	389234	8703831	4418	Piezómetro Relavera Andaychagua, Margen Izquierda del Río	MWH-AND-03-II	384,0	8,2	315,0	53,09	19,28	4,98	1,197	215,09	0,17	0,25	77,45	0,2021	3,144	0,054	1,343	0,004
6	Agua subterránea	388363	8704369	4608	Piezómetro Margen Derecha del Río Andaychagua, Bofedal Ancapampa	MWH-AND-06	646,0	8,01	524,0	87	32,29	2,3	4,2	144,51	0,17	0,137	260,62	0,2242	1,57	0,015	0,0005	0,002
7	Agua subterránea	388616	8700705	4491	Piezómetros Qda. Pacchapuquiopampa Margen izquierda	MWH-AND-07-I	686,0	8,0	521,0	100	19,8	7,2	4,1	60,94	0,17	2,99	313,22	0,8893	16,905	0,481	1,398	0,0246
8	Agua subterránea	388616	8700705	4491	Piezómetros Qda. Pacchapuquiopampa Margen izquierda	MWH-AND-07-II	610,0	7,6	411,0	71,4	17,03	12,12	4,24	52,83	0,17	9,678	251,1	0,97	13,07	0,146	1,97	0,0137
9	Agua subterránea	392333	8700572	4265	Piezometro Relavera Andaychagua, Ubicado al Final de la Presa	MWH-AND-01-I	622	9,87	469,0	22	15	106,85	16,6	139,5	4,42	4,656	226,95	0,375	15,16	0,163	5,957	0,0428

Nota. Elaboración propia.

3.3.1.4. Minera San Cristóbal

Como resultado de los análisis se obtuvieron los siguientes parámetros:

pH

Al observar los datos de pH que se reportan en las Tabla 45, visualizamos que: el 60 % de las muestras sus aguas son ácidas, un 20 % son aguas neutras y otro 20 % sus aguas presentan una ligera alcalinidad (pH = 7,4). Por otro lado, en la Tabla 46, observamos que solo el 20 % de las muestras de aguas son aguas ácidas y que el 80 % de las muestras aguas se consideran como aguas que van desde ligeramente alcalinas a muy alcalinas por presentan valores de pH que van desde 7,7 a 9,1.

Conductividad Eléctrica

Según los resultados en la Tabla 45, se tiene que todas las muestras reportadas serán calificadas como aguas salobres de mineralización alta, ya que presentan valores comprendidos entre los 2490 a 3736 µS/cm. Con respecto a los valores reportados en la Tabla 46, se observa que el 80 % de las muestras de aguas serán calificadas como aguas dulces de mineralización alta, por presentar esta última un valor de 808,5 µS/cm

Sólidos Totales Disueltos

Con respecto al contenido de sólidos totales disueltos en las muestras de aguas reportadas en la Tabla 45, vemos que el 100 % de las muestras analizadas serían, según este parámetro, aguas de tipo salobre. Por otro lado, en la Tabla 46 observamos concentraciones de sólidos totales disueltos que oscilan entre 255,5 a 611 mg/L, rangos que clasifican al 100 % de las muestras, en aguas dulces.

Elementos Mayoritarios

Con respecto a los elementos mayoritarios registrados en las aguas subterráneas tenemos en la Tabla 45, que el 100 % de las muestras tendrían la característica de ser aguas de tipo sulfatadas cálcicas. Así mismo, en la Tabla 46, observamos hasta dos tipos

de aguas según la composición de sus elementos mayoritarios. Es así como las muestras con códigos MWH-SC-02-II, MWH-SC-04-I, MWH-SC-04-II y MWH-SC-06 serían calificadas como aguas de tipo cálcicas bicarbonatadas. Finalmente, un segundo tipo de agua que lo presenta la muestra con código MWH- SC-02-I, calificada como un agua cálcica sulfatada.

Elementos Minoritarios

Con respecto a las concentraciones que se reportan de estos elementos en las aguas subterráneas podemos resaltar que los elementos que se encuentran en mayor concentración tanto en los datos reportados en la Tabla 45 y Tabla 46 son el hierro y manganeso.

Tabla 45

Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el interior de la Mina San Cristóbal

DATOS DE LAS MUESTRAS						PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS			ELEMENTOS MAYORITARIOS									ELEMENTOS MINORITARIOS			
		Coordenadas							Cationes				Aniones					Cationes			
N° de muestra	Clasificación	Este	Norte	Altitud	Tipo de fuente	Código de muestra	Conductividad Eléctrica CE (uS/cm)	pH	Sólidos Totales Disueltos STD (mg/L)	Calcio Ca mg/L	Magnesio Mg mg/L	Sodio Na mg/L	Potasio K mg/L	Bicarbonatos HCO3 mg/L	Carbonatos CO3 mg/L	Cloruros Cl mg/L	Sulfatos SO4 mg/L	Manganeso Mn mg/L	Hierro Fe mg/L	Zinc Zn mg/L	Aluminio Al mg/L	Cobre Cu mg/L
1	Agua subterránea	384928	8702962	1070	Perforación	SC-IM-01P	2940,0	6,86	1542,0	339,9	37,15	3,18	3,428	42,7	0,17	0,5	1070	14,88	24,3	7,664	0,0005	0,00015
2	Agua subterránea	384801	8703052	1070	Perforación	SC-IM-02P	3556	7,0	2170,0	402,4	40,21	4,21	3,536	61,61	0,17	0,907	1373	11,19	13,41	5,516	0,0005	0,002
3	Agua subterránea	385103	8703046	1070	Perforación	SC-IM-03P	3736,0	6,50	2288,0	360,3	48,67	5,11	4,335	0,55	0,17	1,07	1327,0	37,51	55,24	31,04	0,0005	0,002
4	Agua subterránea	384513	8702985	1070	Perforación de Sostenimiento	SC-IM-09P	2950,0	7,4	2100,0	489,8	48,04	3,39	3,851	119.19	0,17	0,907	1436	3,542	6,816	0,844	0,0005	0,002
5	Agua subterránea	384849	8703185	1070	Fractura	SC-IM-11Fr	3210,0	6,7	2394,0	425,1	73,4	6,86	7,778	55,02	0,17	1,723	1707,00	56,21	5,454	67,33	0,0005	0,002

Nota. Elaboración propia.

Tabla 46

Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en los piezómetros

DATOS DE LAS MUESTRAS							PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS		ELEMENTOS MAYORITARIOS								ELEMENTOS MINORITARIOS				
		Coordenadas							Cationes				Aniones				Cationes				
N° de muestra	Clasificación	Este	Norte	Altitud	Tipo de fuente	Código de muestra	Conductividad Eléctrica CE (uS/cm)	pH	Sólidos Totales Disueltos STD (mg/L)	Calcio Ca mg/L	Magnesio Mg mg/L	Sodio Na mg/L	Potasio K mg/L	Bicarbonatos HCO3 mg/L	Carbonatos CO3 mg/L	Cloruros Cl mg/L	Sulfatos SO4 mg/L	Manganeso Mn mg/L	Hierro Fe mg/L	Zinc Zn mg/L	Aluminio Al mg/L	Cobre Cu mg/L
1	Agua subterránea	383634	8703067	-	Piezómetros Margen Izquierda Qda. Ayamachay	MW H-SC-02-I	808,5	9,1	611,0	99,3	48,78	2,86	3,54	157,2	0,17	4,2	320,7	0,73	4,643	0,284	1,365	0,029
2	Agua subterránea	385404	8702190	-	Piezómetros Margen Izquierda Qda. Ayamachay	MW H-SC-02-II	467,0	8,80	408,0	65,61	32	0,73	4,254	307,1	0,17	6,97	268,10	0,442	8,488	0,26	2,85	0,026
3	Agua subterránea	385111	8701693	-	Piezómetros Margen Izquierda Qda. Ayamachay	MW H-SC-04-I	404,5	7,7	276,0	42,5	17,33	4,625	6,778	172,8	0,17	3,03	49,62	0,71	2,737	0,192	0,615	0,006

4	Agua subterránea	384584	8702188	-	Piezómetros Margen Izquierda Qda. Ayamachay	MWH-SC-04-II	368,0	6,8	309,0	44,98	22,46	0,62	2,962	265,47	0,17	0,14	294,20	0,5449	3,09	0,189	0,79	0,00031
5	Agua subterránea	382167	8704984	-	Piezómetro Margen Derecha Qda. Ayamachay, debajo de Tajo Gavilan	MWH-SC-06	335,0	7,9	255,5	38,92	17,88	0,133	0,718	163,84	0,17	0,136	52,96	0,116	1,06	0,0015	0,0015	0,0002

Nota. Elaboración propia.

3.3.1.5. Mina El Porvenir Milpo

Como resultado de los análisis se obtuvieron los siguientes parámetros:

pH

Al observar los datos reportados en la Tabla 47, podemos señalar que por presentar valores de pH comprendidos entre 7,65 a 8,95, sus aguas tienen la característica de ser alcalinas.

Conductividad Eléctrica

Vistos los resultados en la tabla 47, se tiene que según sus valores de conductividad eléctrica todas las zonas presentan aguas de tipo dulces. Siendo las zonas con códigos AS-5, AS-9 y AS-10 de mineralización alta y las zonas con códigos AS-1, AS-2, AS-3, AS-4, AS-6, AS-7, AS-8, AS-11 aguas dulces de mineralización media.

Sólidos Totales Disueltos

Con respecto al contenido de sólidos totales disueltos en las muestras de aguas subterráneas reportadas en la Tabla 47, vemos que todas las zonas de muestreo sus aguas son de tipo dulce a excepción de la zona con código AS-5, que registra un agua de tipo salobre, por presentan un valor de sólidos totales disueltos de 2002 mg/L.

Elementos Mayoritarios

Con respecto a los elementos mayoritarios registrados en las aguas subterráneas que se reportan en la Tabla 47, podemos agruparlas en tipos de aguas. El primer grupo estaría formado por aguas de tipo cálcicas sulfatadas, donde están ubicadas el aproximadamente el 55 % de las zonas muestreadas como son lo que presentan el código AS-1, AS-3, AS-4, AS-5, AS-6 y AS-10, El segundo grupo estaría formado por aguas de tipo cálcicas bicarbonatadas, donde están registradas el 27 % de las aguas que corresponden a las zonas con códigos AS-7, AS-8 y AS-11. Finalmente, un tercer tipo de

agua que son las magnésicas sulfatadas, donde se reportan el 18 % de las zonas como son las que presentan los códigos AS-2 y AS-9.

Elementos Minoritarios

Con respecto a estos elementos en las aguas subterráneas que se reportan en la Tabla 47, podemos mencionar que los elementos encontrados en mayor concentración son el zinc, manganeso y hierro.

Tabla 47

Parámetros y composición físico-química de las aguas subterráneas medidas en el interior de la Mina Milpo

DATOS DE LAS MUESTRAS						PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS			ELEMENTOS MAYORITARIOS										ELEMENTOS MINORITARIOS			
		Coordenadas							Cationes				Aniones						Cationes			
N° de muestra	Clasificación	Este	Norte	Altitud	Código de muestra	Conductividad Eléctrica CE (uS/cm)	pH	Sólidos Totales Disueltos STD (mg/L)	Calcio Ca mg/L	Magnesio Mg mg/L	Sodio Na mg/L	Potasio K mg/L	Bicarbonatos HCO3 mg/L	Carbonatos CO3 mg/L	Cloruros Cl mg/L	Sulfatos SO4 mg/L	Manganeso Mn mg/L	Hierro Fe mg/L	Zinc Zn mg/L	Aluminio Al mg/L	Cobre Cu mg/L
1	Agua subterránea	367903	8827507	-1160	AS-1	462	7,74	314	180,2	27,37	4,384	4,03	261	0,5	3,404	330	1,43	8,464	0,69	1,436	0,00895
2	Agua subterránea	367900	8827511	-1160	AS-2	626	7,65	518,33	549,95	336,56	64,12	68,29	0,5	0,5	13,5	3340,86	97,7	14,25	236,7511	1,3708	0,01 59
3	Agua subterránea	367836	8828025	-1160	AS-3	585	8,1	334	436,47	101,73	15,6	10,52	18,2	0,5	4,9	1799,08	60,47	0,01	99,7081	0,0198	0,0468
4	Agua subterránea	368298	8827707	-1160	AS-4	325	7,68	190	611,96	137,58	22,31	9,74	16,4	0,5	2,7	2733,57	140,14	8,49	15,1205	0,00095	0,00 01
5	Agua subterránea	368386	8828255	-1060	AS-5	1994	8,24	2002	435,69	121,32	4,74	3,85	0,5	0,5	3,4	1864,37	54,34	5,26	38,7657	1,0513	0,0464
6	Agua subterránea	367830	8827539	-600	AS-6	675	8,95	506	125,14	42,82	0,47	1,24	195,3	0,5	0,5	284,26	0,35	0,01	0,0053	0,00095	0,00005
7	Agua subterránea	366854	8827359	-450	AS-7	334	7,89	176	50,63	29,82	0,23	1,25	188,7	1,1	0,05	66,3	0,01	0,0016	0,0296	0,00095	0,00005
8	Agua subterránea	367466	8827414	-450	AS-8	433	7,89	242	40,03	12	0,99	0,84	160,9	6,6	0,2	17,83	0	0,0016	0,0001	0,0031	0,00 03

9	Agua subterránea	367741	8827537	-450	AS-9	1605	8,77	1432	482,12	748,06	32,53	10,89	0,5	0,5	10	13984,64	646,41	980,02	3446,41	43,5464	0,2768
10	Agua subterránea	367617	8828726	-280	AS-10	1350	7,18	1014	353,05	40,22	5,72	3,5	153,8	0,5	1,01	941,78	1,35	5,05	0,058	0,0057	0,0002
11	Agua subterránea	367875	8828602	-280	AS-11	315	7,7	184	165,52	31,78	1,24	2,82	282,8	1,5	0,7	263,73	0,67	0,01	0,031	0,0043	0,0002

Nota. Elaboración propia.

Tabla 48

Promedio de los parámetros y composición fisico-química de las aguas subterráneas medidas en las 5 unidades mineras

UNIDAD MINERA	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS			ELEMENTOS MAYORITARIOS								ELEMENTOS MINORITARIOS				
				Cationes				Aniones				Cationes				
	Conductividad Eléctrica CE (uS/cm)	pH	Sólidos Totales Disueltos STD (mg/L)	Calcio Ca mg/L	Magnesio Mg mg/L	Sodio Na mg/L	Potasio K mg/L	Bicarbonatos HCO3 mg/L	Carbonatos CO3 mg/L	Cloruros Cl mg/L	Sulfatos SO4 mg/L	Manganeso Mn mg/L	Hierro Fe mg/L	Zinc Zn mg/L	Aluminio Al mg/L	Cobre Cu mg/L
Carahuacra	2177,4	-	1903,8	339,3	56,7	18,9	7,6	106,5	0,7	9,4	1158,2	28,9	3,0	26.4	0,7	0,3
Carahuacra	-	6,2	3352,8	363,2	122,1	25,0	10,0	106,6	0,9	3,5	2142,6	73,0	63,6	250,4	3,4	0,3
Atacocha	-	8,06	781,77	164,13	28,96	40,56	3,48	178,42	1,38	54,57	360,54	3,22	5,98	0,69	2,41	0,01
Andaychagua	-	7,37	976,14	184,69	28,31	14,84	16,61	87,79	0,17	0,58	606,31	1,06	5,61	0,10	0,07	0,01
Andaychagua piezometros	655,8	8,4	504,4	79,4	21,7	26,8	6,0	155,9	0,6	524,5	236,5	0,5	8,4	0,2	2,3	0,02026
San Cristóbal	-	6,8920	2098,8000	403,5000	49,4940	4,5500	4,5856	55,8140	0,1700	1,0214	1382,6000	24,6664	21,0440	22,4788	0,0005	0,0002

Nota. Las tablas contienen la información promedio de cada unidad minera del análisis de agua efectuado en los puntos georreferenciados, estas muestras contienen agua de recirculación de operación mina.

3.4. Simulación en ambiente laboratorial

Se procedió a preparar mezclas de *shotcrete* en base al mortero y el uso de aditivos como acelerante y plastificante, asimismo el uso de malla metálica, para la simulación del revestimiento del *shotcrete* dispuesto en mina como se aprecia en la maqueta, aleatoriamente se utilizó las proporciones presentes en las 05 unidades mineras evaluadas: Carahuacra, San Cristóbal, Andaychagua, El Porvenir Milpo y Atacocha a escala.

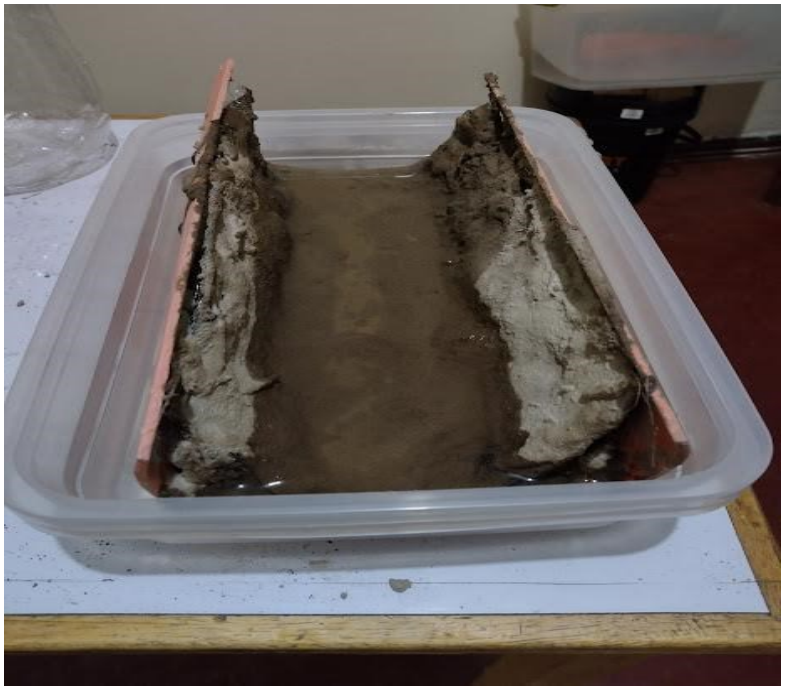
Figura 18

Estructura de simulación (malla + Shotcrete)

Una vez fraguada la mezcla sobre el armado de roca y malla metálica, se puso en contacto directo por un tiempo de 5 horas con agua destilada, con la finalidad de evaluar el aporte de componentes solubles en agua y que modificarían la calidad de esta en forma aislada del contenido de arrastre de las aguas naturales en contacto con la roca y la mezcla de *shotcrete*.

Figura 19

Estructura de simulación sumergida (malla + Shotcrete + agua destilada)



El agua colectada fue enviada para su análisis químico a un laboratorio acreditado como se muestra las evidencias en al Anexo 03 correspondiente. El análisis que se le hizo fue un ICP para metales.

3.5. Análisis Estadístico

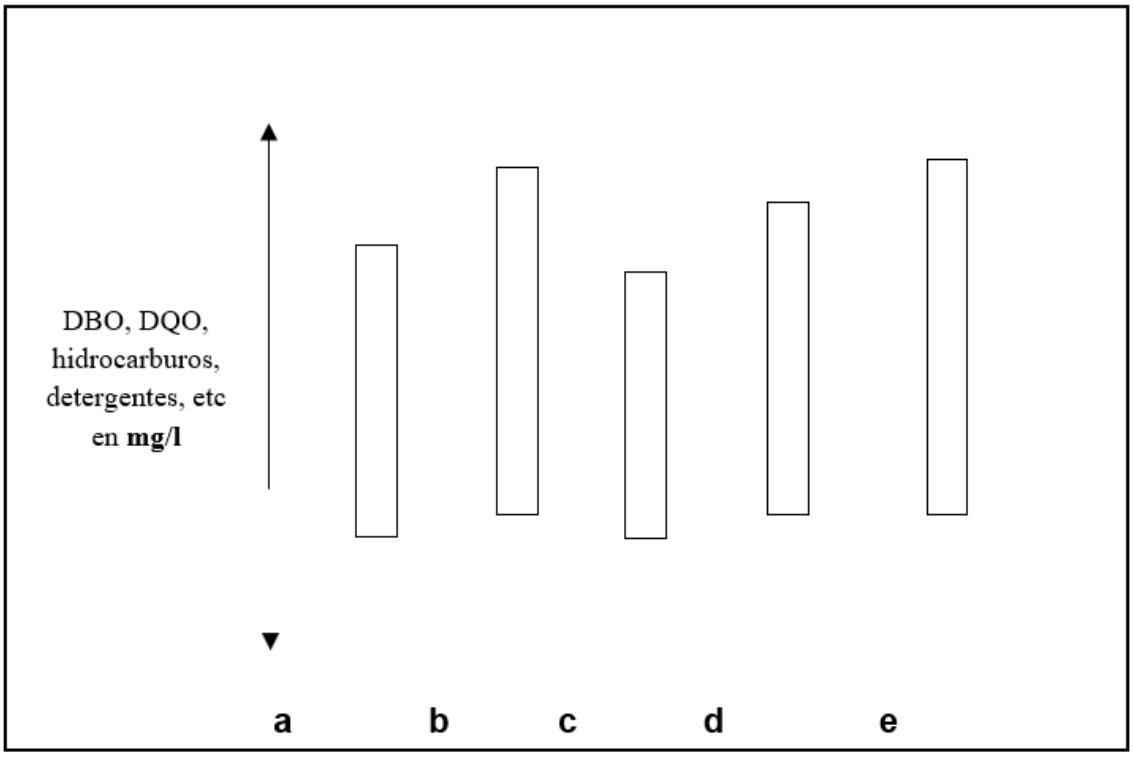
Se propuso usar para el análisis de los datos, así como también las pruebas estadísticas apropiadas en función de la hipótesis y los niveles de medición de las variables el ANOVA ya que se compararán 5 medidas diferentes de caracterización de aguas residuales en laboratorio; sin embargo, al realizarse 01 análisis para cada unidad minera por temas presupuestales, se harán comparaciones de resultados de campo expresados en cuadros comparativos por elementos mayoritarios. Para este análisis se tomará en cuenta dos variables fundamentales.

- Variable independiente: Lanzamiento de *shotcrete* en minería subterránea

- Variable dependiente: Nueva composición química de las aguas residuales en los acuíferos.

Figura 20

Relación de los componentes de las diferentes unidades mineras en una unidad de volumen (1l) mg/l



a = Carahuacra, b = San Cristóbal, c = Andaychagua,

d = El Porvenir (Milpo) y e = Atacocha

3.5.1. Ecuación para el Análisis matemático

Para construir un modelo matemático de la composición química de las aguas residuales de los acuíferos confinados bajo instalaciones mineras subterráneas en las unidades mineras de la sierra central del Perú, podemos utilizar un enfoque que combine los datos medidos con una estimación de las contribuciones de los diferentes componentes presentes.

Dado que no se proporciona información específica sobre las reacciones químicas o la composición del *shotcrete*, se propondrá un modelo lineal simple que considere la contribución de cada parámetro y su interacción con un término adicional representando otras fuentes o reacciones químicas no especificadas.

Un modelo matemático general para el parámetro i puede definirse de la siguiente manera:

$$Ci' = ai \cdot Ci + bi \cdot Si + ci \qquad \textbf{(1)}$$

Donde:

C_i' : es la nueva concentración del parámetro i en el agua subterránea.

C_i : es la concentración inicial del parámetro i en el agua subterránea.

S_i : es la concentración del parámetro i en el *shotcrete* u otro componente introducido.

a_i y b_i son coeficientes que representan la contribución relativa de cada componente.

c_i : es un término adicional que podría representar otras fuentes o reacciones químicas no especificadas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Evaluación del contenido de potenciales contaminantes del *shotcrete* utilizado en cada una de las 05 unidades mineras

Como se sabe, el agua es el solvente universal de los compuestos inorgánicos, por tanto, es justificable la presencia de los componentes de los materiales y aditivos utilizados en el *shotcrete* en la muestra de agua sintética, que contenía los compuestos inorgánicos solubles provenientes del *shotcrete* (la misma que fue preparada considerando solamente arena, cemento, agua, acelerante y plastificante; según las proporciones indicadas), en la Tabla 49 se muestran los principales compuestos contaminantes del *shotcrete*.

Tabla 49

Compuestos potencialmente contaminantes del shotcrete

INSUMOS	COMPOSICIÓN	EFECTOS	PREVENCIÓN
Arena	Dióxido de silicio	No es irritante	Retirar el producto con agua
Cemento	Clinker (óxido de calcio, dióxido de silicio, óxidos de aluminio y hierro y trióxido de azufre)	Irritación en ojos, piel, obstrucción bronquial	Retirar el producto con abundante agua y acuda al medico
Agua	H20	-	-
Fibra Metálica	Acero galvanizado (hierro y zinc)	Riesgo bajo	EPPs
Fibra sintética	Polipropileno	Sin riesgo	EPPs
Viscocrete (plastificante)	Polímero (aspecto oleoso)	Irritación ojos, piel y vomito	EPPs y acudir al medico
Sigunit (acelerante)	Sulfato de aluminio	Lesiones oculares graves	EPPs y acudir al medico
Máster Glenium	Tecnología de policarboxilato	pH acido (3)	EPPs
Máster DELVO (retardante)	Ácido nitrilotrimetilentriposforico hidróxido sódico Ácido fosfonico 4-cloro -- metilfenol	Irritación ocular grave, irritación cutánea, alergia a la piel	EPPs Lavado con abundante agua

4.2. Resultados fisicoquímicos del contenido de contaminantes en una muestra sintética expuesta al contacto con el *shotcrete*

El análisis fisicoquímico consiste en la caracterización de muestras extraídas de un área determinada de estudio a fin de evaluar sus propiedades físicas y químicas, permitiendo a su vez, estudiar la interacción que existe entre sus componentes químicos.

En este caso, se analizaron muestras de agua destilada, a la cual fue expuesta una muestra sintética de mezcla fraguada (*shotcrete*) sobre un armado de roca y malla metálica por un periodo de 5 horas con el fin de determinar el aporte de los componentes solubles en agua presentes y evaluar cuáles de ellos son potenciales contaminantes y que poseen la capacidad de alterar la calidad del agua al establecer contacto.

La Tabla 50 muestra los resultados de la concentración de diferentes elementos presentes en el agua de las cinco minas estudiadas.

Tabla 50

Resultados de la concentración de diferentes elementos presentes en el agua obtenidos de las cinco minas estudiadas

Elemento	Andaychagua	Atacocha	Carahuacra	Milpo	San Cristóbal
Aluminio	1,37 ± 0,762 a	0,89 ± 0,459 b	0,60 ± 0,363 b	0,73 ± 0,409 b	0,63 ± 0,311 b
Bario	0,09 ± 0,057 a	0,09 ± 0,053 a	0,22 ± 0,193 a	0,07 ± 0,052 a	0,33 ± 0,523 a
Calcio	110,28 ± 50,88 b	96,23 ± 42,31 b	268,00 ± 91,09 a	101,87 ± 36,98 b	103,57 ± 42,91 b
Cobre	0,06 ± 0,056 a	0,07 ± 0,055 a	0,08 ± 0,125 a	0,13 ± 0,261 a	0,06 ± 0,038 a
Estroncio	0,74 ± 0,241 b	0,09 ± 0,072 c	1,24 ± 0,491 a	0,80 ± 0,285 b	0,68 ± 0,488 b
Hierro	1,28 ± 0,637 a	1,17 ± 0,688 a	1,10 ± 0,922 a	1.23 ± 0,505 a	1,29 ± 0,430 a
Magnesio	0,12 ± 0,064 b	0,14 ± 0,116 b	0,54 ± 0,344 a	0,30 ± 0,261 ab	0,28 ± 0,288 ab
Molibdeno	0,02 ± 0,016 a	0,02 ± 0,024 a	0,16 ± 0,264 a	0,02 ± 0,012 a	0,01 ± 0,008 a
Plomo	0,01 ± 0,004 b	0,01 ± 0,007 b	0,04 ± 0,040 a	0,01 ± 0,005 b	0,01 ± 0,003 b
Potasio	94,51 ± 40,570 a	89,13 ± 55,735 a	87,64 ± 32,053 a	93,61 ± 33,193 a	94,02 ± 33,862 a
Sodio	368,2 ± 139,96 bc	349,9 ± 159,51 c	460,3 ± 238,86 a	417,6 ± 192,21 ab	364,9 ± 169,55 bc
Vanadio	0,01 ± 0,004 a	0,01 ± 0,007 a	0,01 ± 0,007 a	0,01 ± 0,003 a	0,01 ± 0,003 a
Zinc	0,43 ± 0,181 ab	0,32 ± 0,254 b	0,53 ± 0,417 a	0,41 ± 0,194 ab	0,38 ± 0,212 ab

En la Tabla 50, se observa patrones en la concentración de estos componentes, con variabilidad reflejada tanto en la media como en la desviación estándar. Andaychagua tiene la mayor concentración de aluminio, con un valor promedio de 1,37 mg/L, superando significativamente a las demás donde los niveles de aluminio son mucho más bajos, variando de 0,60 mg/L en Carahuacra a 0,89 mg/L en Atacocha. Para el bario, las concentraciones son comparativamente uniformes entre las cinco minas, pero San Cristóbal muestra el valor más alto con 0,33 mg/L. Por su parte, el calcio presenta la mayor concentración en Carahuacra con 268 mg/L, lo cual es significativamente más alto en comparación con las otras minas. El cobre muestra una distribución más homogénea, aunque Milpo alcanza la concentración más alta con 0,13 mg/L. En cuanto al estroncio, Carahuacra también presenta el nivel más alto con 1,24 mg/L y se observa alta variabilidad en este elemento en comparación con otras minas como Atacocha que tiene el nivel más bajo con 0,09 mg/L. El hierro y el vanadio, a pesar de no mostrar diferencias significativas entre cada caso, exhiben valores estables con desviaciones estándar moderadas que indican una consistencia en la concentración entre las muestras. En el caso del magnesio y el molibdeno, Carahuacra tiene las concentraciones más altas con 0,54 mg/L y 0,16 mg/L respectivamente. El plomo en Carahuacra también muestra el valor más alto con 0,04 mg/L, en comparación con valores mucho menores y más consistentes en otras minas. Similarmente, para el zinc, Carahuacra con un nivel de 0,53 mg/L posee la concentración más alta frente a Atacocha con el más bajo de 0,32 mg/L. En este sentido, Carahuacra se distingue como la mina con los niveles más altos en la mayoría de los elementos estudiados.

La Tabla 51 muestra los resultados de la presencia de aluminio en función del tiempo (24, 48 y 72 horas) y del área (1, 2 y 3 m^2).

Tabla 51

Resultados de la presencia de aluminio

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	0,2066±0,1605 Bc	0,3324±0,2027 Ac	0,4752±0,2048 Ac
48	0,7068±0,1855 Bb	0,8982±0,2346 Ab	1,1558±0,3264 Ab
72	1,0278±0,5074 Ba	1,3354±0,5903 Aa	1,4534±0,6317 Aa

De acuerdo a la Tabla 51, se observa un aumento en la concentración de aluminio conforme aumenta tanto el tiempo como el área de medición. A las 24 horas, la concentración más baja de aluminio se observa en el área de 1 m² (0,2066) con la diferencia significativa más pequeña entre las áreas, mientras que la más alta se registra en el área de 3 m² (0,4752). A las 48 y 72 horas, este patrón se mantiene y se intensifica; a las 48 horas, la concentración aumenta a 0,7068 en 1 m² y alcanza 1,1558 en 3 m², mostrando un aumento significativo conforme el área aumenta. A las 72 horas, el aluminio sigue aumentando, registrando 1,0278 en 1 m² y alcanzando su punto máximo en 3 m² con 1,4534, siendo este último el valor más alto observado en el estudio. Las letras mayúsculas y minúsculas indican diferencias estadísticamente significativas entre las áreas y los tiempos, respectivamente, con las diferencias más marcadas observadas a medida que aumentan ambos factores. Estos resultados sugieren que tanto el aumento del área como el paso del tiempo influyen en la acumulación de aluminio, evidenciando una dinámica de concentración que se intensifica bajo condiciones de mayor exposición espacial y temporal.

La Tabla 52 ilustra cómo varía la concentración de bario con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 52

Resultados de la presencia de bario

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	0,0139±0,0139 Bb	0,019±0,0178 Bb	0,0356±0,0254 Ab
48	0,1025±0,0454 Bab	0,1172±0,0521 Bab	0,3537±0,3906 Aab
72	0,1225±0,0658 Ba	0,1681±0,1188 Ba	0,5009±0,5545 Aa

La Tabla 52 muestra un incremento consistente en la concentración de bario a medida que se incrementan tanto el tiempo como el área de exposición. En las primeras 24 horas, las concentraciones son bajas y similares entre sí, con valores de 0,0139 mg/L para 1 m² y 0,019 mg/L para 2 m², mientras que el área de 3 m² registra una concentración algo mayor de 0,0356 mg/L, mostrando ya una diferencia significativa. A las 48 horas,

este patrón de incremento se hace más notable, con la concentración aumentando a 0,1025 mg/L para 1 m² y saltando a 0,3537 mg/L en 3 m², mostrando no solo un aumento en la concentración sino también en la variabilidad de los datos. Para las 72 horas, las concentraciones alcanzan sus máximos, con 0,1225 mg/L para 1 m² y 0,5009 mg/L para 3 m², siendo este último el valor más alto observado y con la mayor dispersión. La evidencia muestra claramente que tanto el tiempo como el aumento del área expuesta son factores determinantes en la acumulación de bario, con un aumento en la variabilidad que sugiere una posible influencia de condiciones ambientales o métodos de medición más complejos a medida que se incrementan las concentraciones del elemento. Las letras indican diferencias estadísticas significativas, donde las mayúsculas comparan áreas y las minúsculas comparan tiempos dentro de cada área específica.

La Tabla 53 ilustra cómo varía la concentración de calcio con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 53

Resultados de la presencia de calcio

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	63,34±48,699 Cc	83,52±62,4056 Bc	98,16±62,8013 Ac
48	124,326±63,5502 Cb	139,74±72,7797 Bb	184,98±75,0907 Ab
72	133,398±65,6428 Ca	168,2±87,9942 Ba	228,22±129,7054 Aa

La Tabla 53 muestra una clara tendencia de aumento en la concentración de calcio, tanto con el incremento del tiempo como del área de exposición. Inicialmente, a las 24 horas, las concentraciones de calcio son más bajas y presentan un gradiente ascendente desde 63,34 mg/L en 1 m² hasta 98.16 mg/L en 3 m². Este patrón de aumento es consistente y se hace más pronunciado a las 48 horas, donde los valores escalan a 124,326 mg/L en 1 m² y a 184,98± mg/L en 3 m², indicando una acumulación significativa conforme se incrementa el área. Para las 72 horas, los niveles de calcio alcanzan su máximo, con 133,398 mg/L en 1 m² y 228,22 mg/L en 3 m², mostrando la mayor concentración y también la mayor variabilidad en las mediciones. Las letras que

acompañan a los valores indican diferencias estadísticamente significativas, con las mayúsculas comparando las áreas y las minúsculas los tiempos dentro de cada área específica. Este comportamiento sugiere que tanto el factor tiempo como el área son significativos en la dinámica de acumulación de calcio, con una tendencia clara hacia mayores concentraciones y variabilidad en áreas más grandes y tiempos más prolongados.

La Tabla 54 ilustra cómo varía la concentración de cobre con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 54

Resultados de la presencia de cobre

Tiempo (horas)	Área (m2)		
	1	2	3
24	0,0085±0,0035 Bb	0,0289±0,0345 Bb	0,018±0,0069 Ab
48	0,0377±0,0105 Bb	0,0549±0,0189 Bb	0,0906±0,0334 Ab
72	0,0525±0,0197 Ba	0,0738±0,0207 Ba	0,3384±0,2931 Aa

La Tabla 54 muestra cómo la concentración de cobre en agua varía en función del tiempo y del área de exposición. Se observa una tendencia de aumento en las concentraciones de cobre a medida que avanza el tiempo y se incrementa el área expuesta. A las 24 horas, las concentraciones son relativamente bajas, con valores de 0,0085 mg/L en un área de 1 m², aumentando a 0,0289 mg/L en 2 m², y luego descendiendo ligeramente a 0,018 mg/L en 3 m². Este comportamiento inicial cambia significativamente a medida que pasa el tiempo; a las 48 horas, la concentración en 1 m² asciende a 0,0377 mg/L, y sigue aumentando hasta 0,0906 mg/L en 3 m², destacando un aumento notable conforme el área aumenta. El cambio más significativo ocurre a las 72 horas cuando la concentración de cobre en el área de 1 m² es de 0,0525 mg/L, y en el área de 2 m² es de 0,0738 mg/L, mientras que en el área de 3 m² se incrementa notablemente a 0,3384 mg/L, mostrando una variabilidad considerable y la mayor concentración registrada en el estudio. Las letras que acompañan a los valores en la tabla indican diferencias estadísticas significativas, donde las mayúsculas comparan las áreas entre sí y las minúsculas comparan los cambios a lo largo del tiempo dentro de cada área específica. Este

comportamiento sugiere que el factor tiempo y el aumento del área expuesta tienen influencia significativa en la concentración de cobre, mostrando una tendencia clara hacia mayores concentraciones y una variabilidad más alta en áreas más grandes y tiempos más prolongados.

La Tabla 55 ilustra cómo varía la concentración de estroncio con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 55

Resultados de la presencia de estroncio

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	0,2167±0,2139 Bb	0,328±0,2692 ABb	0,4283±0,3418 Ab
48	0,7503±0,4414 Ba	0,8548±0,493 ABa	0,9926±0,5597 Aa
72	0,8424±0,4765 Ba	0,9353±0,5492 ABa	1,0541±0,5539 Aa

La Tabla 55 ilustra el comportamiento de la concentración de estroncio en función del tiempo y del área de exposición, demostrando un incremento constante en las concentraciones conforme aumentan ambos factores. Inicialmente, a las 24 horas, la concentración de estroncio en 1 m² es de 0,2167 mg/L, que aumenta a 0,328 mg/L en 2 m², y alcanza los 0,4283 mg/L en 3 m². Este patrón de aumento se mantiene y se intensifica con el tiempo; a las 48 horas, los valores suben a 0,7503 mg/L en 1 m² y se extienden hasta 0,9926 mg/L en 3 m², indicando un crecimiento notable en la concentración conforme se incrementa el área. A las 72 horas, las concentraciones de estroncio alcanzan sus máximos, con 0,8424 mg/L en 1 m² y 1,0541 mg/L en 3 m², mostrando la mayor concentración registrada y una variabilidad considerable en las mediciones. Las letras mayúsculas y minúsculas indican diferencias estadísticas significativas, donde las mayúsculas comparan las áreas entre sí y las minúsculas comparan los cambios a lo largo del tiempo dentro de cada área específica. Esta tendencia sugiere que tanto el tiempo como el aumento del área expuesta son significativos en la acumulación de estroncio, con un aumento claro en las concentraciones y en la variabilidad de las mediciones a mayores áreas y tiempos más prolongados.

La Tabla 56 ilustra cómo varía la concentración de estroncio con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 56

Resultados de la presencia de hierro

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	0,4076±0,2861 Bc	0,5198±0,3249 Bc	0,6156±0,3409 Ac
48	0,9865±0,0976 Bb	1,2062±0,1292 Bb	1,7954±0,2554 Ab
72	1,5312±0,2646 Ba	1,7958±0,1787 Ba	2,0848±0,2195 Aa

La Tabla 56 presenta cómo la concentración de hierro evoluciona en función del tiempo y del área de exposición, mostrando un patrón de aumento progresivo en las concentraciones a medida que avanza el tiempo y se expande el área. A las 24 horas, las concentraciones comienzan en un nivel más bajo con 0,4076 mg/L para el área de 1 m², ascendiendo a 0,5198 mg/L para 2 m², y llegando a 0,6156 mg/L para 3 m². Este aumento inicial es significativo y se acentúa notablemente a las 48 horas, donde los niveles de hierro suben a 0,9865±0,0976 mg/L en 1 m² y se incrementan hasta 1,7954 mg/L en 3 m², mostrando un aumento marcado en la concentración conforme aumenta el área. Para las 72 horas, los niveles de hierro alcanzan sus puntos máximos con 1,5312 mg/L en 1 m² y escalando hasta 2,0848 mg/L en 3 m². La variabilidad en las mediciones es considerable, pero se mantiene relativamente estable en comparación con el aumento en la concentración. Las diferencias estadísticamente significativas, indicadas por las letras mayúsculas y minúsculas, muestran que hay una distinción clara entre las áreas y el tiempo, áreas más grandes y tiempos más prolongados muestran mayores concentraciones de hierro. Este comportamiento indica que tanto el factor tiempo como el aumento en el área de exposición tienen influencia en la acumulación de hierro, evidenciando una tendencia clara hacia mayores concentraciones y una variabilidad moderada en las áreas más grandes y a medida que se prolonga el tiempo de exposición.

La Tabla 57 ilustra cómo varía la concentración de magnesio con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 57

Resultados de la presencia de Magnesio

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	0,0497±0,0354 Ba	0,2357±0,29 ABa	0,3287±0,3628 Aa
48	0,1314±0,0596 Ba	0,2168±0,109 ABa	0,452±0,3018 Aa
72	0,196±0,1034 Ba	0,338±0,2569 ABa	0,537±0,4303 Aa

La Tabla 57 detalla la evolución de la concentración de magnesio en función del tiempo y del área, mostrando un incremento constante en las concentraciones a medida que se incrementan estos dos factores. A las 24 horas, la concentración de magnesio en el área de 1 m² es relativamente baja, con un valor de 0,0497 mg/L, pero aumenta significativamente a 0,2357 mg/L para 2 m² y aún más a 0,3287 mg/L para 3 m². Esta tendencia se mantiene a lo largo del tiempo; a las 48 horas, los valores de concentración ascienden a 0,1314 mg/L en 1 m² y alcanzan 0,452 mg/L en 3 m², mostrando un crecimiento notable conforme aumenta el área expuesta. Para las 72 horas, los niveles de magnesio continúan aumentando, registrando 0,196 mg/L en 1 m² y llegando a 0,537 mg/L en 3 m², el valor más alto observado en el estudio. Las diferencias estadísticamente significativas indicadas por las letras mayúsculas y minúsculas señalan una clara distinción tanto entre las áreas como a lo largo del tiempo dentro de cada área específica. Las áreas más grandes y los tiempos más prolongados muestran las mayores concentraciones de magnesio. Este comportamiento que tanto el factor tiempo como el incremento del área tienen una influencia significativa en la acumulación de magnesio, mostrando una tendencia clara hacia mayores concentraciones y una mayor variabilidad en áreas más grandes y a medida que avanza el tiempo de exposición.

La Tabla 58 ilustra cómo varía la concentración de molibdeno con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 58

Resultados de la presencia de molibdeno

Tiempo (horas)	Área (m2)		
	1	2	3
24	0,0018±0,0014 Aa	0,0027±0,0018 Aa	0,0048±0,0017 Aa
48	0,0098±0,0011 Aa	0,0195±0,0122 Aa	0,1285±0,2301 Aa
72	0,0171±0,0061 Aa	0,0413±0,0265 Aa	0,1747±0,2886 Aa

La Tabla 58 expone los resultados de la presencia de molibdeno en función del tiempo y del área de exposición, donde se observa una tendencia de incremento en las concentraciones a medida que avanzan ambos factores. Inicialmente, a las 24 horas, las concentraciones son bastante bajas y uniformes en todas las áreas, registrando 0,0018 mg/L en 1 m², 0,0027 mg/L en 2 m², y 0,0048 mg/L en 3 m². Este aumento es progresivo y se vuelve más pronunciado con el tiempo; a las 48 horas, los valores se incrementan a 0,0098 mg/L en 1 m² y se escalan significativamente a 0,1285 mg/L en 3 m², mostrando una mayor variabilidad en esta última medida. Para las 72 horas, las concentraciones alcanzan sus máximos en el estudio con 0,0171 mg/L en 1 m² y se extienden hasta 0,1747 mg/L en 3 m², mostrando la mayor concentración y la mayor variabilidad en el área más grande. A pesar de que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las áreas y tiempos dentro de cada área, la tendencia al aumento de las concentraciones es clara y consistente a través del tiempo y del aumento del área de exposición. Este comportamiento indica que tanto el factor tiempo como el aumento en el área influyen significativamente en la concentración de molibdeno, mostrando un patrón marcado hacia mayores concentraciones y una variabilidad más alta en áreas más grandes y conforme se prolonga el tiempo de exposición.

La Tabla 59 ilustra cómo varía la concentración de plomo con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 59

Resultados de la presencia de plomo

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	0,0013±0,0009 Ab	0,0021±0,0016 Ab	0,0027±0,002 Ab
48	0,007±0,004 Aab	0,0172±0,0217 Aab	0,0248±0,0309 Aab
72	0,0124±0,0127 Aa	0,0268±0,0388 Aa	0,0316±0,0384 Aa

La Tabla 59 muestra la evolución de la concentración de plomo en función del tiempo y del área de exposición, mostrando un aumento claro y continuo en las concentraciones a medida que se incrementan ambos factores. Inicialmente, a las 24 horas, las concentraciones son bastante bajas en todas las áreas, empezando por 0,0013 mg/L en 1 m², incrementándose a 0,0021 mg/L en 2 m², y alcanzando 0,0027 mg/L en 3 m². Este aumento se intensifica significativamente a las 48 horas, con la concentración ascendiendo a 0,007 mg/L en 1 m² y ampliándose drásticamente a 0,0248 mg/L en 3 m², destacando un crecimiento marcado en la concentración conforme aumenta el área. Para las 72 horas, los niveles de plomo alcanzan sus máximos, registrando 0,0124±0,0127 mg/L en 1 m² y extendiéndose hasta 0,0316 ± 0,0384 mg/L en 3 m², siendo este último el valor más alto observado en el estudio y con la mayor variabilidad. Las diferencias entre áreas y tiempos son estadísticamente significativas y las tendencias de aumento son consistentes y marcadas en todas las comparaciones. Esto quiere decir que tanto el tiempo como el área son influyentes en la acumulación de plomo, evidenciando un patrón claro hacia mayores concentraciones y una variabilidad más alta en áreas más grandes y a medida que avanza el tiempo de exposición.

La Tabla 60 ilustra cómo varía la concentración de potasio con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 60

Resultados de la presencia de potasio

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	38±5,1995 Cc	53,42±6,9772 Bc	53,342±29,6824 Ac
48	87,47±1,4932 Cb	96,032±3,9441 Bb	124,32±20,6032 Ab
72	99,4±3,2901 Ca	121,38±8,8222 Ba	152,7±13,4417 Aa

La Tabla 60 muestra cómo la concentración de potasio en el agua varía en función del tiempo y del área de exposición, mostrando un aumento progresivo en las concentraciones conforme se incrementan estos dos factores. Inicialmente, a las 24 horas, las concentraciones comienzan en 38 mg/L en 1 m² y se incrementan a 53,42 mg/L y 53,342 mg/L en 2 m² y 3 m² respectivamente, con una variabilidad notablemente más alta en la mayor área. A las 48 horas, este patrón de crecimiento continúa, con concentraciones que suben a 87,47 mg/L en 1 m² y alcanzan 124,32 mg/L en 3 m². Finalmente, a las 72 horas, los niveles de potasio alcanzan sus picos máximos con 99,4 mg/L en 1 m² y 152,7 mg/L en 3 m², siendo este último el valor más alto registrado. Las letras en la tabla, donde las mayúsculas comparan áreas y las minúsculas comparan los cambios en el tiempo dentro de cada área, indican diferencias estadísticamente significativas. Tanto el tiempo como el área de exposición son determinantes en la acumulación de potasio, mostrando una clara tendencia hacia mayores concentraciones y una disminución en la variabilidad relativa a medida que se incrementa el tiempo de exposición y el área.

La Tabla 61 ilustra cómo varía la concentración de sodio con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 61

Resultados de la presencia de Sodio

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	136,6±14,8593 Cb	166,8±22,687 Bb	211±36,8103 Ab
48	407,8±35,9402 Ca	462±99,8499 Ba	582±107,0981 Aa
72	444,2±43,2516 Ca	514,8±47,2832 Ba	604,4±97,1432 Aa

La Tabla 61 muestra la evolución de las concentraciones de sodio en función del tiempo y del área de exposición, mostrando una tendencia de aumento continuo y significativo. Inicialmente, a las 24 horas, las concentraciones de sodio comienzan en 136,6 mg/L para el área de 1 m², suben a 166,8 mg/L para 2 m², y alcanzan 211 mg/L en 3 m², y se observa una diferencia notable en la concentración según el tamaño del área. A las 48 horas, este incremento es significativo en tanto la concentración asciende a 407,8 mg/L en 1 m², se eleva a 462 mg/L en 2 m² y llega a 582 mg/L en 3 m². Para las 72 horas, las concentraciones de sodio alcanzan sus niveles más altos con 444,2 mg/L en 1 m², 514,8 mg/L en 2 m², y 604,4 mg/L en 3 m², siendo este último el valor más alto observado en el estudio. Se observan diferencias estadísticamente significativas, esto quiere decir que tanto el tiempo como el área de exposición son factores que influyen significativamente en la acumulación de sodio, con un claro aumento en las concentraciones a medida que aumenta el área y el tiempo.

La Tabla 62 ilustra cómo varía la concentración de vanadio con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 62

Resultados de la presencia de vanadio

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	0,0012±0,0008 Bc	0,0024±0,001 Bc	0,0037±0,0009 Ac
48	0,0061±0,0009 Bb	0,0079±0,0009 Bb	0,0108±0,0028 Ab
72	0,0087±0,0017 Ba	0,0119±0,0039 Ba	0,0156±0,0066 Aa

La Tabla 62 presenta los resultados de la concentración de vanadio en el agua, mostrando un incremento constante en función del tiempo y del área de exposición. En las primeras 24 horas, las concentraciones son bajas, partiendo de 0,0012 mg/L en el área de 1 m², aumentando a 0,0024 mg/L en 2 m², y alcanzando 0,0037 mg/L en 3 m². Este incremento se mantiene en la evolución de los datos; a las 48 horas, las concentraciones ascienden a 0,0061 mg/L en 1 m² y llegan a 0,0108 mg/L en 3 m², reflejando un aumento significativo conforme se incrementa el área. Para las 72 horas, las concentraciones de

vanadio alcanzan los valores más altos, con 0,0087 mg/L en 1 m² y llegando hasta 0,0156 mg/L en 3 m². Las diferencias son estadísticamente significativas con las áreas más grandes y tiempos más prolongados exhibiendo las mayores concentraciones de vanadio. Estos resultados indican que el factor tiempo y el incremento del área de exposición influyen positivamente en la acumulación de vanadio, evidenciando una clara tendencia hacia mayores concentraciones y un incremento a medida que se prolonga el tiempo de exposición y se aumenta el área.

La Tabla 63 ilustra cómo varía la concentración de vanadio con respecto al tiempo (24, 48 y 72 horas) y al área (1, 2 y 3 m²).

Tabla 63

Resultados de la presencia de zinc

Tiempo (horas)	Área (m^2)		
	1	2	3
24	0,087±0,0755 Bc	0,1261±0,0889 Bc	0,2101±0,1618 Ac
48	0,3261±0,042 Bb	0,4637±0,0938 Bb	0,6196±0,0647 Ab
72	0,4693±0,1901 Ba	0,6501±0,2126 Ba	0,7684±0,2012 Aa

La Tabla 63 ilustra cómo las concentraciones de zinc en agua evolucionan en función del tiempo y del área de exposición, mostrando un incremento claro y progresivo. Inicialmente, a las 24 horas, las concentraciones empiezan en 0,087 mg/L en el área de 1 m², aumentan a 0,1261 mg/L en 2 m², y alcanzan 0,2101 mg/L en 3 m², demostrando un aumento notable con el incremento del área. Este patrón se intensifica a las 48 horas con las concentraciones elevándose a 0,3261 mg/L en 1 m² y expandiéndose hasta 0,6196 mg/L en 3 m². Para las 72 horas, los niveles de zinc alcanzan valores máximos con 0,4693 mg/L en 1 m² y 0,7684 mg/L en 3 m², siendo los valores más altos observados en el estudio. La tabla muestra diferencias estadísticas significativas, indicando a mayores valores de tiempo y área mayores concentraciones de zinc. Estos resultados indican que el tiempo y área son factores que influyen en la acumulación de zinc, mostrando un claro patrón de incremento en las concentraciones a medida que aumenta el área y se prolonga el tiempo de exposición.

La Tabla 64 muestra los resultados de los coeficientes del análisis de componentes principales (PCA).

Tabla 64

Resultados de coeficientes PCA

	Al	Ba	Ca	Cu	Sr	Fe	Mg	Mo	Pb	K	Na	Va	Zn
Al	1,00												
Bar	0,21	1,00											
Ca	0,26	0,43	1,00										
Cu	0,31	0,19	0,35	1,00									
Sr	0,29	0,47	0,78	0,28	1,00								
Fe	0,74	0,49	0,49	0,45	0,50	1,00							
Mg	0,02	0,58	0,73	0,24	0,61	0,37	1,00						
Mo	0,15	0,30	0,72	0,33	0,50	0,36	0,61	1,00					
Pb	0,17	0,35	0,88	0,25	0,67	0,47	0,66	0,79	1,00				
K	0,76	0,47	0,49	0,52	0,48	0,90	0,38	0,26	0,36	1,00			
Na	0,61	0,50	0,69	0,50	0,73	0,85	0,46	0,49	0,62	0,84	1,00		
Va	0,63	0,42	0,61	0,44	0,40	0,87	0,46	0,52	0,57	0,83	0,78	1,00	
Zn	0,60	0,53	0,73	0,45	0,73	0,90	0,56	0,54	0,72	0,83	0,90	0,83	1,00

La Tabla 64 muestra los coeficientes de correlación entre diferentes metales en un análisis de componentes principales (PCA), que refleja cómo cada metal se relaciona con los demás dentro de un conjunto de datos. Las correlaciones observadas indican cómo estos elementos podrían estar interconectados con el fin de comprender mejor las interacciones químicas del agua en contacto con el *shotcrete*. El hierro, sodio y zinc muestran altas correlaciones con muchos otros elementos, lo cual indica que estos metales pueden tener una fuente común o comportamientos similares. El hierro tiene una correlación muy alta con el potasio (0,90), el sodio (0,85) y el vanadio (0,87), sugiriendo que estos elementos podrían estar influenciados por factores geológicos o procesos inherentes del contacto del agua con el *shotcrete*. Por otro lado, el calcio muestra correlaciones significativas con el estroncio (0,78) y el plomo (0,88), lo cual podría indicar una asociación geológica común, una absorción paralela en procesos biológicos o geoquímicos, o una interacción química con el *shotcrete*. Magnesio, molibdeno y plomo también exhiben correlaciones altas con varios metales, especialmente en relación con el calcio y el estroncio.

La Tabla 65 muestra la correlación de componentes principales.

Tabla 65

Correlación de componentes principales

Variables	CP 1	CP 2	CP 3
Aluminio	0,5892	0,6503	-0,0592
Bario	0,5909	-0,1049	0,6722
Calcio	0,8292	-0,4309	-0,1065
Cobre	0,522	0,199	-0,4296
Estroncio	0,7587	-0,3024	0,1437
Hierro	0,8641	0,4168	0,0625
Magnesio	0,6698	-0,5267	0,2235
Molibdeno	0,6582	-0,4951	-0,3428
Plomo	0,7664	-0,4979	-0,1961
Potasio	0,8299	0,4801	0,0773
Sodio	0,9209	0,1678	0,0043
Vanadio	0,8597	0,2497	-0,098
Zinc	0,9576	0,0984	0,0308

La Tabla 65 detalla la matriz de correlación de los componentes principales (CP) para diferentes metales, revelando cómo cada uno contribuye a las variaciones observadas en los datos analizados. Los resultados indican que el primer componente principal (CP 1) tiene fuertes correlaciones positivas con la mayoría de los metales, particularmente con el Zinc (0,9576), el Sodio (0,9209), el Hierro (0,8641) y el Potasio (0,8299), lo que indica que este componente captura una varianza significativa asociada con procesos o fuentes comunes que influyen en estos elementos.

El segundo componente principal (CP 2) muestra una variación notable en su correlación, donde el Aluminio tiene un valor positivo (0,6503), mientras que elementos como el Plomo (-0,4979) y el Magnesio (-0,5267) presentan valores negativos, indicando comportamientos distintos o influencias ambientales que afectan a estos metales de manera distinta. El tercer componente principal (CP 3) generalmente tiene correlaciones más bajas y mixtas, con el Bario (0,6722) mostrando la correlación más significativa que indica una influencia significativa en con este elemento. Las cargas en los componentes

principales sugieren que mientras el CP 1 podría estar relacionado con influencias geológicas o procesos químicos comunes que afectan a la mayoría de los metales, el CP 2 y el CP 3 podrían estar capturando efectos más específicos y locales, como diferencias en la solubilidad, procesos de oxidación, o influencias antrópicas (*shotcrete*) que afectan de manera diferente a estos metales.

La Tabla 66 muestra el análisis de varianza (ANOVA) utilizado para la metodología de superficie de respuesta del hierro presente en el agua.

Tabla 66

Análisis de varianza para la metodología de superficie de respuesta correspondiente a hierro

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	12,473	1	12,473	186,55	0,0000
B: Área	2,05543	1	2,05543	30,74	0,0000
AA	0,289776	1	0,289776	4,33	0,0447
AB	0,149299	1	0,149299	2,23	0,1441
BB	0,0395817	1	0,0395817	0,59	0,4468
bloques	0,221048	4	0,055262	0,83	0,5173
Error total	2,34015	35	0,0668614		
Total (corr.)	17,5683	44			

En el estudio del comportamiento del hierro en relación con el tiempo y el área de exposición, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA), revelando que ambos factores y sus interacciones influyen significativamente en las concentraciones de hierro. Los resultados del ANOVA indican que el tiempo (F=186.55, p=0,0000) y el área (F=30,74, p=0,0000) son los principales factores que afectan significativamente los niveles de hierro, siendo el tiempo el más influyente de los dos. Las interacciones entre el tiempo y el área (Tiempo*Área, F=2.23, p=0,1441) también fueron examinadas, aunque no todas resultaron ser estadísticamente significativas.

El modelo de regresión ajustado para describir la relación entre las concentraciones de hierro, el tiempo y el área se expresa con la siguiente ecuación:

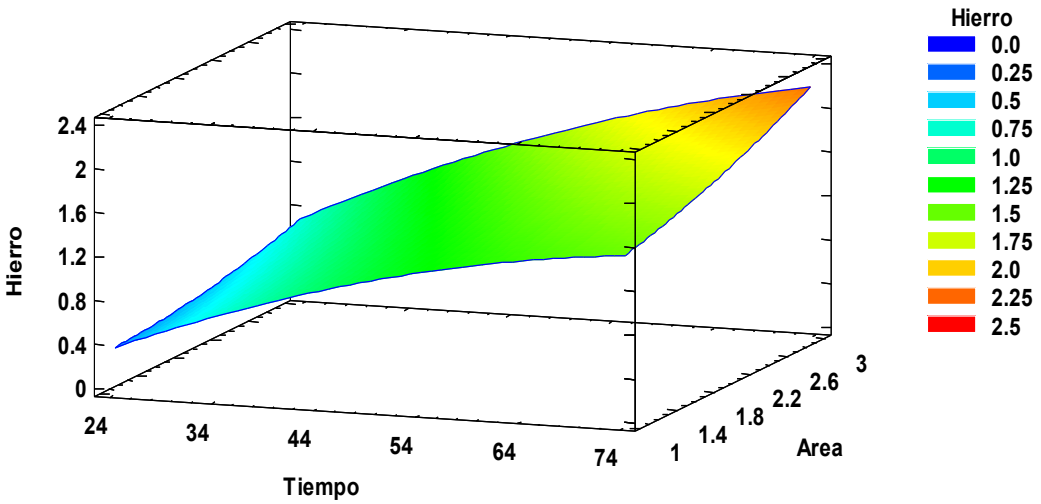
$$Hierro = -0{,}609343 + 0{,}048038 * Tiempo - 0{,}162703 * Área - 0{,}0002955 * Tiempo^2 + 0{,}0036 * Tiempo * Área + 0{,}0629 * Área^2$$

Esta ecuación refleja cómo los cambios en el tiempo y el área impactan los niveles de hierro, donde los términos lineales y cuadráticos describen la curvatura y las interacciones en la superficie de respuesta.

Utilizando la ecuación de regresión y los resultados del ANOVA, se generó una superficie de respuesta para visualizar el efecto combinado del tiempo y el área sobre las concentraciones de hierro. La optimización basada en esta superficie de respuesta busca identificar las condiciones óptimas de tiempo y área que maximizan o minimizan las concentraciones de hierro, de acuerdo a estos factores.

Figura 21

Superficie de respuesta del contenido de hierro



La Tabla 67 muestra el análisis de varianza (ANOVA) utilizado para la metodología de superficie de respuesta del hierro presente en el agua.

Tabla 67

Análisis de varianza para la metodología de superficie de respuesta correspondiente a potasio

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	43593,3	1	43593,3	222,07	0,0000
B: Área	9273,8	1	9273,8	47,24	0,0000
AA	2635,32	1	2635,32	13,42	0,0008
AB	1801,01	1	1801,01	9,17	0,0046
BB	51,1363	1	51,1363	0,26	0,6130
bloques	359,507	4	89,8768	0,46	0,7660
Error total	6870,64	35	196,304		
Total (corr.)	64584,7	44			

El análisis de varianza (ANOVA) y la regresión lineal aplicados a las concentraciones de potasio en relación con el tiempo y el área revelan efectos significativos de estos factores y su interacción. Los resultados del ANOVA indican que el factor tiempo tiene un efecto altamente significativo sobre el potasio con un valor F de 222,07 y un p-valor de 0,0000, Similarmente, el área también muestra un impacto significativo con un valor F de 47.24 y un p-valor de 0,0000, Además, las interacciones entre tiempo y tiempo (AA) y entre tiempo y área (AB) son estadísticamente significativas, mientras que la interacción entre área y área (BB) no lo es.

La ecuación de regresión ajustada para el potasio, basada en estos resultados, es:

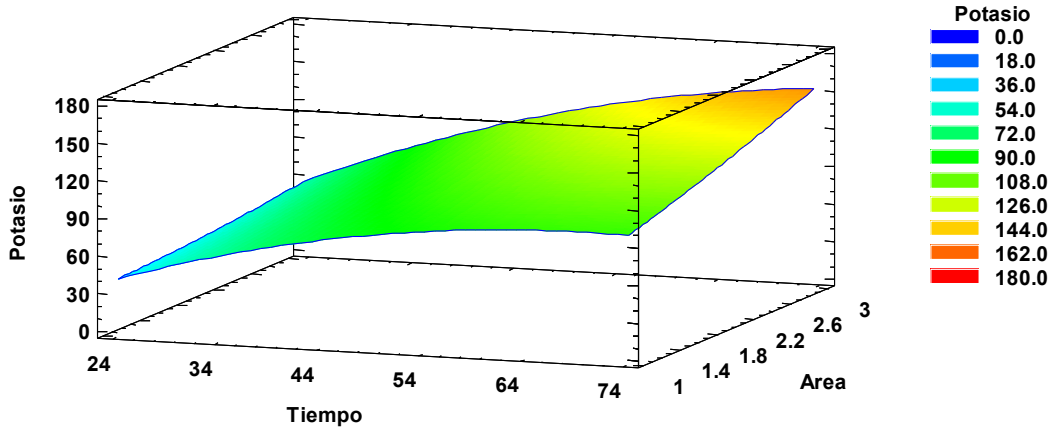
$$Potasio = -28.2349 + 3.50314 * Tiempo - 10{,}4423 * Área - 0{,}02818 * Tiempo^2 + 0{,}3954 * Tiempo * Área + 2.2613 * Área^2$$

Esta ecuación refleja cómo el potasio responde a cambios en el tiempo y en la extensión del área, incluyendo tanto efectos lineales como cuadráticos y de interacción. Los términos positivos para el tiempo y la interacción tiempo-área sugieren que mayores duraciones y combinaciones específicas de tiempo y área aumentan las concentraciones de potasio, mientras que el término negativo para el área sugiere una disminución en las concentraciones con mayores áreas.

Utilizando la ecuación de regresión y los resultados del ANOVA, se generó una superficie de respuesta para visualizar el efecto combinado del tiempo y el área sobre las concentraciones de potasio. La optimización basada en esta superficie de respuesta busca identificar las condiciones óptimas de tiempo y área que maximizan o minimizan las concentraciones de hierro, dependiendo del objetivo específico del estudio.

Figura 22

Superficie de respuesta del contenido de potasio



La Tabla 68 muestra el análisis de varianza (ANOVA) utilizado para la metodología de superficie de respuesta de sodio presente en el agua.

Tabla 68

Análisis de varianza para la metodología de superficie de respuesta correspondiente a sodio

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	917001,0	1	917001,0	379,14	0,0000
B: Área	139265,0	1	139265,0	57,58	0,0000
AA	189429,0	1	189429,0	78,32	0,0000
AB	9202,05	1	9202,05	3,80	0,0592
BB	2711,51	1	2711,51	1,12	0,2969
bloques	75565,0	4	18891,3	7,81	0,0001
Error total	84653,3	35	2418,67		
Total (corr.)	1,41783E6	44			

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a las concentraciones de sodio respecto al tiempo y el área ha revelado que ambos factores tienen un impacto significativo. El tiempo muestra una influencia especialmente destacada con una razón-F de 379,14 y un valor-P extremadamente bajo, subrayando su importancia crítica. El área también demuestra ser un factor significativo, con una razón-F de 57,58, lo que indica su relevante efecto en las concentraciones de sodio. Las interacciones entre las variables también son relevantes, particularmente la interacción tiempo-tiempo (AA) que es altamente significativa con una razón-F de 78,32. Sin embargo, la interacción tiempo-área (AB) muestra una significancia marginal (valor-P de 0,0592), y la interacción área-área (BB) no resulta significativa.

El modelo de regresión para el sodio, ajustado a partir de estos resultados, se formula de la siguiente manera:

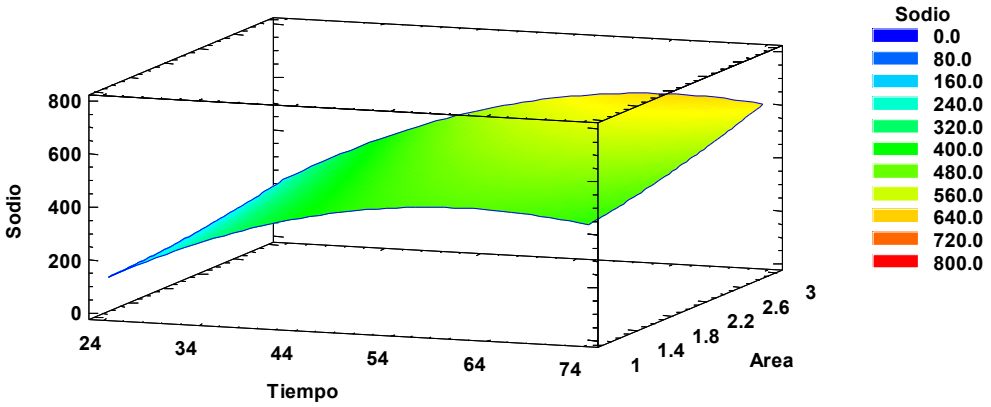
$$Sodio = -411.844 + 28.436 * Tiempo - 40{,}633 * Área - 0{,}239 * Tiempo^2 + 0{,}894 * Tiempo * Área + 16.467 * Área^2$$

Este modelo refleja cómo los ajustes en el tiempo y el área influyen directamente en los niveles de sodio, permitiendo conocer la respuesta de la concentración de sodio ante factores de tiempo y área. Los términos cuadráticos y de interacción en la ecuación muestra cierto nivel de complejidad entre las relaciones del sodio, el tiempo y el área.

Utilizando la ecuación de regresión y los resultados del ANOVA, se generó una superficie de respuesta para visualizar el efecto combinado del tiempo y el área sobre las concentraciones de potasio. La optimización basada en esta superficie de respuesta busca identificar las condiciones óptimas de tiempo y área que maximizan o minimizan las concentraciones de hierro, con respecto a los factores tiempo y área.

Figura 23

Superficie de respuesta del contenido de sodio



La Tabla 69 muestra el análisis de varianza (ANOVA) utilizado para la metodología de superficie de respuesta de zinc presente en el agua.

Tabla 69

Análisis de varianza para la metodología de superficie de respuesta correspondiente a zinc

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	1,71406	1	1,71406	118,03	0,0000
B: Área	0,463918	1	0,463918	31,95	0,0000
AA	0,0997641	1	0,0997641	6,87	0,0129
AB	0,0386936	1	0,0386936	2,66	0,1116
BB	0,002355	1	0,002355	0,16	0,6896
bloques	0,219644	4	0,054911	3,78	0,0117
Error total	0,508258	35	0,0145217		
Total (corr.)	3,04669	44			

El análisis de varianza (ANOVA) para el zinc muestra que tanto el tiempo como el área tienen impactos significativos en las concentraciones de este metal, con el tiempo como el factor más influyente. La razón-F de 118,03 y un valor-P extremadamente bajo (0,0000), lo que subraya la importancia crítica de este factor. Similarmente, el área también tiene un efecto considerable, con la razón-F de 31,95 (p=0,0000). Las interacciones entre las variables revelan que solo la interacción tiempo-tiempo es estadísticamente significativa, lo que indica efectos complejos que requieren

consideración detallada en modelos predictivos o de control. El modelo de regresión muestra cómo varían las concentraciones de zinc en respuesta a los cambios en estas variables, estableciendo una interpretación sobre cómo el tiempo y el área inciden en la concentración de zinc en el agua. La ecuación del modelo ajustado para el zinc es la siguiente.

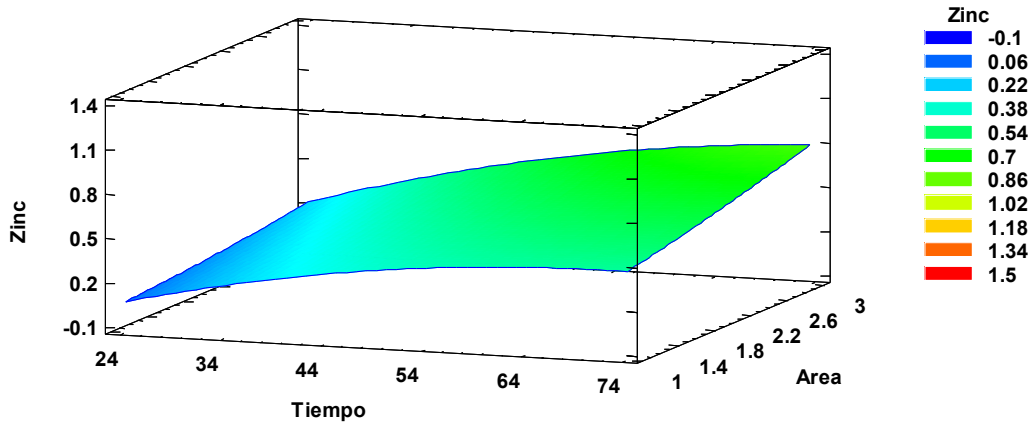
$$Zinc = -0{,}4192 + 0{,}023 * Tiempo - 0{,}025 * Área - 0{,}00017 * Tiempo^2 + 0{,}0018 * Tiempo * Área + 0{,}0153 * Área^2$$

Esta ecuación modela cómo las concentraciones de zinc responden a variaciones en el tiempo y en la extensión del área, incorporando tanto efectos lineales como cuadráticos y de interacción. Este modelo sugiere que la evolución del tiempo y el incremento del área influyen significativamente en los niveles de concentraciones de zinc, y es importante para la gestión de contaminación ambiental o en procesos industriales con presencia de zinc.

Utilizando la ecuación de regresión y los resultados del ANOVA, se generó una superficie de respuesta para visualizar el efecto combinado del tiempo y el área sobre las concentraciones de zinc. La optimización basada en esta superficie de respuesta busca identificar las condiciones óptimas de tiempo y área que maximizan o minimizan las concentraciones de hierro, dependiendo del objetivo específico del estudio.

Figura 24

Superficie de respuesta del contenido de sodio



4.3. Contrastación de Hipótesis

La hipótesis de investigación es la siguiente:

Hipótesis General (H_1): "El modelo matemático de la nueva composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados a partir del lanzamiento de *shotcrete* en unidades mineras subterráneas está determinado por los aditivos, cemento, variaciones en el pH, grado de turbidez y reacciones químicas del agua residual."

De esta manera, para el siguiente caso la hipótesis nula sería:

Hipótesis Nula (H_0): "El modelo matemático de la nueva composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados a partir del lanzamiento de *shotcrete* en unidades mineras subterráneas no está determinado por los aditivos, cemento, variaciones en el pH, grado de turbidez y reacciones químicas del agua residual."

Los resultados de la investigación realizada encontraron fueron los siguientes:

- Se validó un modelo matemático parcial para caracterizar la nueva composición química de las aguas residuales en las cinco unidades mineras subterráneas del centro del país.
- Se observó que existen variaciones en el pH, conductividad eléctrica, y sólidos totales disueltos en las aguas residuales, lo que demuestra el potencial contaminante a los acuíferos confinados. Las simulaciones de laboratorio indican que la combinación química generada por los aditivos y cemento del *shotcrete* puede ser nociva al superar los límites de detección para algunos metales, y por tanto para la calidad del agua infiltrada en los acuíferos confinados.
- Se comprobó que se generan nuevas asociaciones químicas en las aguas residuales debido a las reacciones químicas con los aditivos y cemento.

Análisis de Contrastación de la Hipótesis Nula

Aunque se determinó que las aguas residuales muestran variaciones en su composición química (pH, conductividad, etc.) y que estas variaciones son potencialmente nocivas para los acuíferos confinados, se pudo validar parcialmente un modelo matemático uniforme que explica dicha composición en todas las unidades mineras.

Los resultados sugieren que, aunque hay un efecto claro de los aditivos y el cemento en la química del agua, el modelo matemático propuesto no es aplicable de manera generalizada en todas las unidades mineras estudiadas, lo que podría deberse a la especificidad geomecánica, geotécnica e hidrogeológica de cada región.

Por tanto, dado que los resultados solo permiten validar un modelo matemático parcial para las unidades mineras estudiadas, no se puede rechazar la hipótesis nula. Esto implica que, bajo las condiciones del estudio, no se puede afirmar que el modelo matemático propuesto esté determinado por los aditivos, cemento, variaciones en el pH, grado de turbidez y reacciones químicas del agua residual de manera general para todas las unidades mineras subterráneas evaluadas. Sin embargo, se confirma la presencia de potencial contaminante y variaciones químicas específicas en el agua residual que podrían estar relacionadas con estos factores, pero sin un modelo matemático generalizable que las explique completamente.

En términos generales, los resultados sugieren que, aunque hay un efecto claro de los aditivos y el cemento del *shotcrete* en la composición química del agua residual, las ecuaciones encontradas en la investigación no son aplicables de manera generalizable en todas las unidades mineras estudiadas. Esto se debe principalmente a la composición química particular de cada muestra de agua residual de lanzado de *shotcrete* en cada unidad minera, sus condiciones geomecánicas, geotécnicas e hidrogeológicas. Ecuaciones que se presentan en el presente capítulo. Por tanto, dado que los resultados permiten validar un modelo matemático parcial, no se puede realizar un modelo general de acuerdo a la hipótesis de investigación planteada.

No obstante, sí se encontró que el modelo matemático hipotético está determinado por el tiempo y el área así como interacciones con los aditivos, composición del *shotcrete*, variaciones en el pH, grado de turbidez y reacciones químicas del agua residual. A su vez, se encontró en laboratorio que estas aguas residuales producto del lanzamiento del *shotcrete* tienen potencial contaminante y sus variaciones químicas específicas en el agua residual podrían estar relacionadas con estos factores, pero sin un modelo matemático generalizable que las explique completamente.

La investigación debido a limitaciones metodológicas y prácticas que se derivan del plan de tesis aprobado originalmente fue realizada bajo un enfoque de evaluación integral de la información. Los datos actuales fueron recolectados y analizados imitando la situación real de la mina donde el agua residual se produce como una mezcla de compuestos provenientes del agua residual del *shotcrete*. Este enfoque es consistente con el plan de tesis aprobado y, por lo tanto, no se desagregaron los procesos de dilución y degradación de manera individual o la composición del agua residual con respecto al tiempo de manera exhaustiva. La investigación se llevó a cabo con la intención de reflejar de la manera más fiel posible las condiciones reales, lo que limita la posibilidad de aplicar un modelo matemático detallado como el sugerido que cuantifique estos fenómenos aisladamente.

DISCUSIONES

Los resultados obtenidos muestran patrones consistentes de contaminación en el agua debido a la actividad minera. A lo largo de los tiempos de exposición y áreas evaluadas, se observó un incremento significativo en la concentración de metales como el aluminio, el calcio, el hierro, el zinc y el plomo, entre otros. Estos hallazgos están en línea con estudios previos que sugieren que las actividades mineras son una fuente importante de contaminación del agua debido a la liberación de metales pesados y elementos traza en los cuerpos de agua subterráneos y superficiales.

El aluminio, presente en concentraciones más altas en la mina de Andaychagua (1,37 mg/L), mostró un incremento significativo con el aumento del área y del tiempo de exposición. Estudios como el de Zhang et al. (2019) han documentado que el aluminio es un metal liberado comúnmente durante la actividad minera, y que puede alterar la calidad del agua al aumentar su acidez y afectar los ecosistemas acuáticos (Zhang et al., 2019). La tendencia observada en este estudio sugiere que la actividad minera en Andaychagua podría estar contribuyendo significativamente a la contaminación del agua con aluminio, lo que tiene implicaciones críticas para la salud del ecosistema y el consumo humano.

El hierro y el zinc presentaron un aumento en sus concentraciones, especialmente en Carahuacra, que mostró los valores más altos de zinc (0,53 mg/L) y hierro (1,29 mg/L). Estos resultados son consistentes con investigaciones previas que han documentado la lixiviación de estos metales desde los residuos de las minas hacia los cuerpos de agua cercanos. Según investigaciones de Peppas et al. (2000), la actividad minera puede liberar grandes cantidades de hierro y zinc al medio ambiente, que al entrar en contacto con el agua pueden alterar significativamente sus propiedades químicas (Peppas et al., 2000).

La concentración de plomo también mostró un patrón preocupante, con un valor máximo registrado de 0,04 mg/L en Carahuacra. Esto supera los límites aceptables establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el consumo humano (0,01 mg/L). Estudios anteriores han demostrado que el plomo es altamente tóxico y su presencia en el agua puede ser devastadora para la salud humana, causando efectos

neurológicos graves, especialmente en niños (Wasserman et al., 2003). La presencia de plomo en niveles elevados en el agua subterránea de las zonas mineras plantea serias preocupaciones sobre la seguridad del suministro de agua.

La tendencia general de los resultados indica que a medida que se aumenta el área de exposición y el tiempo, las concentraciones de los metales también se incrementan. Este fenómeno ha sido descrito por estudios como el de Hudson et al. (2001), quienes argumentan que las áreas más grandes y las exposiciones prolongadas permiten una mayor interacción entre los materiales de desecho de las minas y el agua, lo que aumenta la lixiviación de metales pesados (Hudson et al., 2001).

Con respecto a la normatividad, en el Perú, el Reglamento de Estándares de Calidad Ambiental para Agua (Decreto Supremo Nº 004-2017-MINAM) establece los límites máximos permisibles (LMP) de varios metales y elementos en agua, tanto para cuerpos de agua superficiales como subterráneos. Este reglamento se aplica principalmente a actividades mineras y otras industrias que pueden afectar la calidad del agua. Para aluminio, el LMP en el agua de consumo humano es de 0,2 mg/L. En el estudio, la mina Andaychagua presentó una concentración de 1,37 mg/L, lo cual supera significativamente este límite. Esta sobreexposición podría representar un riesgo para la salud humana, ya que el aluminio en concentraciones elevadas está asociado con efectos neurotóxicos y renales. El plomo, según la normatividad peruana, tiene como LMP el valor de 0,01 mg/L para agua potable. En la mina Carahuacra se reportó una concentración de 0,04 mg/L, que excede ampliamente este límite. El plomo es uno de los metales más peligrosos debido a su toxicidad, afectando el sistema nervioso y siendo particularmente dañino para niños y mujeres embarazadas. El LMP del hierro es de 0,3 mg/L para aguas destinadas a consumo humano, sin embargo, todas las minas en este estudio superaron este valor, con concentraciones que van desde 1.10 mg/L hasta 1,29 mg/L. La exposición a altas concentraciones de hierro puede manchar el agua, dificultar su tratamiento y tener efectos adversos sobre la salud a largo plazo. El LMP del zinc para aguas de consumo humano es de 3 mg/L. Aunque las concentraciones en este estudio (0,32 - 0,53 mg/L) están dentro de los límites permisibles, los niveles altos en ciertas minas sugieren que se debe monitorear para evitar futuros aumentos.

Para el Organismo Mundial de la Salud (OMS), los límites recomendados por la OMS para el consumo de agua son similares a los establecidos en Perú. Por ejemplo, el plomo no debe exceder los 0,01 mg/L y el aluminio no debe sobrepasar los 0,2 mg/L. El incumplimiento de estos límites en las minas peruanas indica un riesgo significativo de contaminación del agua, lo cual está alineado con investigaciones que señalan la minería como una fuente importante de liberación de metales pesados al medio ambiente (Järup, 2003).

Los niveles de metales pesados como el hierro, el plomo y el zinc tienen implicaciones directas sobre los ecosistemas acuáticos y la salud pública. Según estudios previos, la exposición prolongada a estos metales en cuerpos de agua puede afectar la biodiversidad acuática, generando toxicidad en peces y otros organismos acuáticos. Asimismo, el consumo de agua contaminada por metales pesados puede tener efectos adversos sobre la salud humana, como enfermedades renales y cardiovasculares, problemas neurológicos y cáncer (Järup, 2003).

Si se tiene en cuenta que la actividad minera subterránea es una fuente significativa de recursos naturales y no renovables, esta fuente según Prieto e Yzaguirre (2021), son los recursos naturales llevados a la economía para convertirlos en bienes y servicios. El medio ambiente es la principal fuente de recursos necesarios para el desarrollo de los procesos productivos y para el consumo directo. Siendo una actividad esencial en el desarrollo económico para muchas regiones y la obtención de materias primas naturales, pero también puede enfrentar desafíos significativos en términos de gestión y evaluación ambiental.

En las diferentes actividades del ciclo de minado subterráneo, no todos los efluentes que se utilizan son encausados en los distintos niveles del sistema de bombeo que existe en el interior mina. Dentro de los principales aportantes para la generación de efluentes se encuentra el *shotcrete*, que es un insumo utilizado en la minería subterránea para fortalecer el sostenimiento de las labores mineras subterráneas y prevenir daños por caída de rocas para garantizar la seguridad en las operaciones mineras. Sin embargo, la disposición inadecuada de la mezcla durante la actividad del lanzamiento del *shotcrete*

puede infiltrar con distintos componentes químicos a través de fallas locales, hacia los acuíferos subterráneos.

En la actualidad, solo los puntos de monitoreo se restringen en tomar muestras en las bocaminas y en bocatomas de salida de agua de las instalaciones de plantas de tratamiento para efluentes; sin embargo, debería tomarse en cuenta como puntos de monitoreo en interior mina zonas representativas en donde se realice sostenimiento con lanzamiento de *shotcrete*.

Según el SENACE, mediante el DS Nº 016-93-EM, estipula lo siguiente:

> Es obligación del titular poner en marcha y mantener programas de control contenidos en el EIA y/o Programas de Adecuación y Manejo Ambiental, basados en sistemas adecuados de muestreo, análisis químicos, físicos y mecánicos, que permitan evaluar y controlar en forma representativa los efluentes y otros que puedan generar su actividad mediante sus procesos, generando efectos negativos sobre el medio ambiente. El tipo, número y ubicación de los puntos de control estarán de acuerdo con las características geográficas de cada región donde se encuentra ubicado el centro productivo. (Art.6)

Teniendo en cuenta que, para la extracción y el procesamiento de minerales se utiliza agua de recirculación como insumo en la realización de distintas operaciones, afectando su composición con productos químicos, metales pesados y otros contaminantes (cuando estas aguas residuales llegan a los acuíferos subterráneos) pueden tener efectos perjudiciales duraderos en la calidad del agua.

Hacia el año 2030, resulta vital adoptar acciones preventivas y de reducción de la contaminación de los acuíferos confinados. Con este propósito, se presenta la siguiente visión a futuro: En un futuro el Perú buscará desarrollarse con una actividad minera que incorpore aspectos socioambientales y territoriales, creando así un crecimiento duradero. Esta visión se refiere a un contexto deseado y aspiracional de cómo se espera que sea la industria minera en un horizonte de tiempo específico, siendo una propuesta que resume

los valores objetivos y metas que se espera alcanzar en el sector minero que considera aspectos ambientales y de gobernanza hacia un futuro más positivo y responsable.

Se ha consolidado como una herramienta competitiva e innovadora, gozando de la valoración de toda la sociedad; por consiguiente, en relación con el proyecto de investigación "Modelo Matemático de la composición de las aguas residuales en los acuíferos a partir del lanzamiento de *shotcrete* en unidades mineras subterráneas ubicadas en la sierra central del Perú", se encuentra en línea, contribuyendo con la visión a una minería más sostenible para evitar la contaminación en los acuíferos confinados, para ello se tomó en cuenta dos atributos y tres actividades que se encuentran directamente relacionadas:

Analizando como primer atributo "Es ambientalmente sostenible", su importancia radica en buscar la reducción de impactos ambientales que se producen en el proceso de las actividades en el ámbito minero. Enfocándonos en el ciclo de minado subterráneo donde se utiliza *shotcrete* para el sostenimiento, se sabe que no todo el efluente es encausado en las cunetas y llevadas a las pozas de sedimentación, por lo tanto un porcentaje es infiltrado a través de diferentes tipos de discontinuidades, provocando contaminación a los acuíferos subterráneos; es por ello que, se debería analizar puntos de monitoreo en interior mina para así identificar si se cumplen los estándares de calidad ambiental, en caso no se ejecute se debe buscar soluciones para mitigar estos impactos negativos en los acuíferos confinados de manera sostenible.

La comprensión de las condiciones hidrogeológicas en los emplazamientos mineros es esencial para minimizar el impacto en las aguas subterráneas, y para desarrollar soluciones de gestión y mitigación que sean prácticas y rentables, asimismo, se requerirá la elaboración de planes de gestión de agua y residuos, así como conocimiento especializado en el estudio de las interacciones entre agua subterránea y superficie, flujo de agua subterránea, hidrología de contaminantes e hidrología de la zona vadosa (Herrera, 2019).

Como segundo atributo se consideró “Es competitiva e innovadora”, ya que todo el proceso de desarrollo del ciclo de minado subterráneo, requiere necesariamente que se efectúen diferentes labores entre las cuales están el desarrollo, preparación y explotación para extraer el mineral. En este proceso denominado “Ciclo de minado subterráneo”, se necesitan de otros servicios auxiliares tales como la ventilación, sostenimiento, iluminación, sistema de bombeo de las aguas y riego de vías que requieren agua en su proceso para la explotación del mineral.

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el marco de una propuesta de alta competitividad en la gestión hídrica en las unidades mineras subterráneas; de modo relevante y original que contribuya para el conocimiento, compresión del problema y tenga una metodología sólida teniendo un enfoque de investigación para el sector minero. Para lo cual, se considera la Visión de la Minería en el Perú al 2030 como el referente de sostenibilidad ambiental a través del cual esta investigación aportará a su consolidación, estableciendo una conexión con las siguientes actividades:

Actividad uno: “Difundir y adoptar las mejores prácticas nacionales e internacionales de gestión hídrica en toda la cadena de valor minera, principalmente para contribuir con la gestión integrada de los recursos hídricos en el territorio nacional, adoptando para ello los más altos estándares ambientales.”

Es importante fortalecer las instituciones encargadas, para que tomen en cuenta esta propuesta de investigación, con el fin de realizar un análisis, manejo y difusión de información más precisa sobre la toma de muestras para monitoreos en interior mina, el cual permita tomar decisiones basadas en datos precisos y actualizados de modo que se reduzcan los impactos ambientales negativos sobre los recursos hídricos.

Además, se considera fundamental identificar el porcentaje de agua que no siguen el proceso de encauzamiento a través del sistema de bombeo y que se infiltra, para luego poder realizar una mejora continua a partir de la indagación de datos certeros, siendo analizados para la realización de buenas prácticas y así evitar la contaminación de los acuíferos confinados.

Actividad dos: “Impulsar la I+D+i en todo el ciclo productivo y la cadena de valor de la actividad minera.”

Es primordial invertir en la investigación, desarrollo e innovación para ayudar a mitigar los impactos negativos en los recursos hídricos producto de la contaminación por la actividad minera, aportando con el cumplimiento de las regulaciones de estándares ambientales para mejorar la calidad de los cuerpos de agua, asegurando la sostenibilidad a largo plazo, evitando la contaminación y repercusión de salud en las personas del entorno.

Actividad tres: “El Estado deberá impulsar un marco legal moderno e innovador, incluyendo la promoción de la exploración minera, manteniendo altos estándares ambientales y sociales.”

El mapear los procedimientos y realizar análisis de calidad regulatoria para mejorar permanentemente y hacerla más eficiente, es una estrategia fundamental para garantizar que los procesos sean eficientes, efectivos y estén alineados con los objetivos de sostenibilidad para el desarrollo. Este enfoque contribuye con identificar cuáles deben ser los puntos de monitoreo en interior mina para obtener datos que demuestren el cumplimiento de los estándares ambientales, promoviendo una industria minería más competitiva y responsable.

Así mismo, el presente trabajo de investigación optó como base normativa la “Política Nacional del Ambiente al 2030”, ya que nuestro trabajo de investigación aportará estableciendo lineamientos que llevarán a cumplir con los objetivos prioritarios que se encuentran relacionados.

El primer objetivo prioritario que guarda relación es “ Reducir la contaminación del agua y suelo”; será eficiente debido a que la investigación se basa en el análisis de la contaminación de los acuíferos confinados, como consecuencia del lanzamiento de *shotcrete* para el sostenimiento, debido a que un porcentaje entre el 3 % y 5 % aproximadamente de efluentes está siendo infiltrada, lo cual llega a los acuíferos

subterráneos y de esta manera está afectando a la comunidad, es por esta razón que al realizar esta investigación nos ayudará para posteriormente establecer soluciones en la reducción de la contaminación del agua y al mismo tiempo del suelo; para ello se plantearon lineamientos de gestión con el fin de lograr la meta de los objetivos prioritarios:

> Optimizar el nivel de eficiencia en cuanto a procedimientos de control, supervisión y restablecimiento de la calidad medioambiental, tanto de los recursos hídricos como de los suelos identificados dentro del área de influencia; se busca asegurar una supervisión confiable para garantizar que las operaciones se realicen de manera responsable y en línea con el cumplimiento de los estándares ambientales. Por consiguiente, una fiscalización continua y eficaz, permitirá conocer datos y los principales contaminantes, logrando efectuar una mejor recuperación y remediación de áreas ambientalmente dañadas.

"Incrementar mejoras que potencien la operatividad de los instrumentos técnicos que rigen la calidad ambiental englobando a todo el entorno hídrico y medio ambiente"; mediante la implementación de un sistema de evaluación constante que supervisará los puntos clave de liberación y efluentes mineros, se obtendrán datos clave para el control de la calidad hídrica, lo que permitirá a su vez una mejora en los instrumentos aplicables.

De igual manera, será necesario "alcanzar un nivel óptimo y efectivo en la aplicación de regulaciones técnicas a fin de promover un enfoque socioambiental y adoptar una postura de actitud ética y respetuosa en referencia al entorno del ámbito minero". Esto será llevado a cabo a través de la supervisión confiable de la adhesión a los Estándares de Calidad Ambiental por parte de las instalaciones mineras bajo observación. Se brindarán también programas de formación relacionados con estos reglamentos técnicos, buscando fomentar prácticas sustentables conforme a los mencionados Estándares de Calidad Ambiental. Además, se mantendrá una revisión y actualización periódica de las regulaciones vigentes, asegurándose de que estén en concordancia con las últimas investigaciones concernientes a las unidades mineras.

Por último como segundo objetivo “Mejorar el comportamiento ambiental de la ciudadanía”, tiene como finalidad que las empresas mineras mejoren en su cumplimiento de los estándares ambientales comprometiéndose en mitigar los impactos para lograr una sostenibilidad ambiental, por otro lado, brindar capacitaciones a los mineros antes de realizar las diferentes actividades del proceso del ciclo de minado subterráneo sobre la importancia de proteger los recursos hídricos, para ello se tomó en cuenta dos lineamientos con sus respectivos servicios con el fin de lograr la meta del objetivo prioritario:

Del mismo modo, se debe asegurar el enfoque ambiental en el ámbito minero, promoviendo la concientización sobre los deberes hacia los recursos hídricos. Una de las prioridades esencial es garantizar que la sostenibilidad hídrica ambiental sea parte integral de la educación oficial y de los esfuerzos de concientización en las comunidades, con un énfasis particular en cultivar la comprensión de las obligaciones relacionadas con la preservación de los recursos hídricos.

Por consiguiente, la capacidad de los ciudadanos para contribuir sosteniblemente en asuntos ambientales relacionados con los acuíferos confinados, mediante el fortalecimiento de su involucramiento y participación en la gestión de estos recursos subterráneos. Uno de los propósitos importantes es aumentar la habilidad de los habitantes para desempeñar un papel duradero en la preservación de los acuíferos confinados y sus entornos, a través de la consolidación de su compromiso y contribución eficaz en la administración responsable de estos recursos subterráneos.

Para concluir, la Visión de la Minería en el Perú al 2030 se alinea con la Política Nacional del Ambiente en buscar una sostenibilidad ambiental que se ajusten a los objetivos primordiales establecidos. De esta manera, nuestra investigación aporta en la realización de algunos objetivos prioritarios de la Política y nos dirige hacia el cumplimiento de ciertos atributos y actividades de la Visión de la Minería al 2030,

Esta relación implica que la minería pueda operar dentro de los estándares ambientales y se convierta en un aliado para la protección de los recursos hídricos. El

estándar ambiental aumenta significativamente las exigencias para que la industria logre resultados sociales, ambientales y técnicos sólidos, eleva la responsabilidad a los niveles organizacionales más altos y agrega nuevos requisitos para la supervisión independiente, asimismo, establece expectativas claras en torno a los requisitos de transparencia y divulgación globales (Organización de Naciones Unidas, 2020).

Además, las empresas mineras se deberán comprometer a mitigar la contaminación del agua y a contribuir positivamente al bienestar de las comunidades. Por esta razón la visión de la minería y la política ambiental trabajan en paralelo para un desarrollo minero sostenible en el país.

CONCLUSIONES

1. Los resultados del estudio indican una presencia significativa de metales pesados como el aluminio, plomo, hierro, y zinc en el agua de las minas evaluadas, superando en muchos casos los límites máximos permisibles establecidos por la normativa peruana y los estándares internacionales. Minas como Carahuacra y Andaychagua destacan por presentar las mayores concentraciones de varios elementos, lo que pone en riesgo tanto los ecosistemas acuáticos como la salud humana. El plomo, en particular, excede los límites recomendados para el agua potable, lo que representa una grave amenaza ambiental y sanitaria debido a sus efectos tóxicos acumulativos. La actividad minera, tal como se observó en este estudio, es una fuente clave de contaminación por metales pesados, lo que subraya la necesidad urgente de mejorar las prácticas de gestión ambiental en estas zonas para mitigar los riesgos.

   El modelamiento matemático aplicado a la concentración de hierro, plomo, sodio y zinc en función del tiempo y el área de exposición mostró que el tiempo es el principal factor que contribuye en el incremento de las concentraciones de metales en el agua. Las ecuaciones de regresión lineal y cuadrática revelan una interacción compleja entre el área y el tiempo, especialmente en el caso del sodio y el hierro, que presentan tendencias de aumento sostenido conforme se incrementa el tiempo de exposición. Los modelos generados permiten conocer el comportamiento de las concentraciones futuras de estos metales en distintos escenarios, lo que permite planificar estrategias de mitigación en las operaciones mineras y garantizar la protección de los cuerpos de agua cercanos.

   En virtud de lo anteriormente sustentado se validó un modelo matemático de forma parcial que caracteriza de manera aproximada la nueva composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados solamente a partir del lanzamiento de *shotcrete* en las cinco unidades mineras subterráneas del centro del país; sin embargo, sí se ha determinado por la presencia de aditivos, cemento y agregados, que existen variaciones en el pH, conductividad

eléctrica, sólidos totales disueltos (tanto elementos mayoritarios y minoritarios). Por lo tanto, se infiere que existe una potencial contaminación por infiltración de aguas residuales en los acuíferos confinados ubicados por debajo de la cuenca hídrica de los emplazamientos mineros materia del presente estudio.

2. A partir de los resultados de las simulaciones en laboratorio se deduce que la combinación química que se genera a partir de los aditivos y cemento de las aguas residuales recreados es nociva para la calidad de agua que se infiltra en los acuíferos confinados.

3. Se ha comprobado sobre la base de los datos de laboratorio obtenidos que se generan nuevas asociaciones químicas al producirse las reacciones de los compuestos químicos preexistentes sumados a los aditivos y cemento en las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados.

RECOMENDACIONES

Sobre la base de los juicios efectuados en el acápite de Discusiones, se proponen las siguientes 04 recomendaciones como resultado del trabajo realizado:

1. Futuras investigaciones deben considerar análisis multivariables de acuerdo a las condiciones particulares del caso estudiado. Debido a la gran cantidad de factores intervinientes y determinantes, como las características hidrogeológicas, las características de acidez de las aguas que producen las minas, el tipo de roca presente, la velocidad de filtración de las aguas producto de *shotcrete*, su interacción con otras aguas residuales industriales, la velocidad de recarga de los acuíferos, precipitación, entre otros, la elaboración de un modelo matemático integral es un desafío, por lo que es recomendable que próximos estudios aíslen algunas de estas variables a fin de construir un modelo viable y comprobable en campo. Se espera que en el futuro, el aumento de información experimental sobre estas variables permita elaborar modelos más completos y, por tanto, complejos que permitan predecir no solo el efecto de la filtración de las aguas residuales del lanzamiento del *shotcrete* sino también de otras aguas residuales industriales en los cuerpos de aguas subterráneos.

2. Partiendo sobre la base del plan de manejo ambiental que obligatoriamente deben tener aprobadas en su EIA detallado las unidades mineras materia de la presente investigación, con respecto al recurso hídrico superficial y subterráneo; ellos deberán por mutuo propio programar monitoreos internos de la calidad de agua en diferentes zonas del emplazamiento minero, especialmente en las áreas de explotación minera y avance de las labores de desarrollo, de tal forma que se pueda garantizar las medidas de control necesarias para evitar que si infiltre efluentes con una mayor carga contaminante como consecuencia de las tareas que se realizan en el ciclo de minado, especialmente el sostenimiento con *shotcrete*.

3. Respecto a las obligaciones que tiene el sector minero con respecto a la nueva Política Nacional del Ambiente al 2030 aprobada vía Decreto Supremo Nº 023-

2021-MINAM el 25 de julio del 2021 se propone remitir copia de la presente investigación como sustento para que nuestra alma mater (UNJBG) cumpla con su rol estratégico de aportar medidas correctivas a los problemas ambientales de nuestro país en el marco de impulsar la I+D+i y que corresponden a las líneas de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas del cual orgullosamente soy egresado.

4. Finalmente, con respecto a la metodología utilizada en la presente investigación se recomienda sea difundida como alternativa para inferir problemáticas similares en donde ya sea por vacío legal o por impedimento expreso, no se pueden evaluar procesos de cualquier sector productivo que potencialmente pudieran generan impactos ambientales negativos sobre los ecosistemas emplazados en las zonas de influencia directa e indirecta, y que son motivo de conflictividad social con las comunidad que se sienten afectadas por la realización de dicha actividad productiva. Esto va a significar que el artículo científico que se presentará de esta investigación tenga que ser difundido en los foros académicos locales, nacionales e internacionales. Desde ya el suscrito asume dicho compromiso.

5. Se sugiere que futuros estudios consideren análisis multivariables que aborden las variables de tiempo, dilución, degradación, y otros factores determinantes, con el objetivo de desarrollar modelos más complejos y aplicables a escenarios específicos. Esto reconoce la validez de contar con un mayor presupuesto, pero también subraya las limitaciones prácticas y metodológicas de la investigación actual.

En síntesis, la presente investigación busca justamente mejorar los procesos de monitoreo de efluentes que generan las unidades mineras, planteando la posibilidad no solamente de medir la calidad de agua en las bocaminas de las unidades mineras sino que los representantes de OEFA puedan ingresar a los frentes de explotación y poder tomar muestras más representativas de la calidad del agua, claro está con toda la rigurosidad que exigen los protocolos de toma de muestra de campo que aplica esta institución del estado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production, 14*(12-13), 1139–1145. https://doi.org/10,1016/j.jclepro.2004,09,006

Andreo, B., Vadillo, I., Carrasco, F., Neukum, C., Jiménez, P., Liñán, C., & Cobos, A. (2005). Consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico y la vulnerabilidad a la contaminación de la Sierra de las Nieves (Málaga) a partir de un ensayo de trazador en condiciones de estiaje. *Geogaceta*(37), 143-146. http://hdl.handle.net/10272/8829

Arias, J. (2020). *Proyecto de tesis guía para la elaboración.*

Armendáriz, E. (2016). *Áreas naturales protegidas y minería en México: perspectivas y recomendaciones.* [Tesis doctoral, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.]. http://dspace.cibnor.mx:8080/handle/123456789/497

Azcue, J. (2000). *Environmental impacts of mining activities: Emphasis on aquifer protection and remediation* (Vol. 17). Spinger.

Bastidas, I. (2020). *Mejoramiento del ciclo de minado para incrementar productividad en la Unidad Operativa Untuca-Empresa Cori Puno SAC-2020.* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. http://hdl.handle.net/20.500.12894/6400

Bear, J., & Cheng, A. (2010). *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport.*

Belghit, A., & Benyaich, M. (2014). Numerical Study of Heat Transfer and Contaminant Transport in an Unsaturated Porous Soil. *Journal of Water Resource and Protection, 6*, 1238-1247. https://doi.org/10,4236/jwarp.2014.613113

Breña, A., & Jacobo, M. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial.* Universidad Autónoma Metropolitana.

Burden, R., & Faires, J. (2011). *Numerical analysis.* Cengage Learning.

Cabrera, M. (2010). *Influencia de la Persistencia de una Familia de Discontinuidades en la Estabilidad frente al Deslizamiento de una Presa de Gravedad.* [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/4517/

Cardona, C. (2021). *Caracterización y estandarización de los sistemas de bombeo en minería subterránea.* Universidad de Antioquia.

Celada, B., Tardáguila, I., Rodriguez, A., Varona, P., & Bieniawski, Z. (2014). Actualización y mejora del RMR. *Ingeopres, 234*(1), 18-22. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4770056

Conesa, C., & Pérez, P. (2014). Alteraciones geomorfológicas recientes en los sistemas fluviales mediterráneos de la Península Ibérica: Síntomas y problemas de incisión en los cauces. *Revista de Geografía Norte Grande*(59), 25-44. https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000300003

Correa, E. (2016). *Resistencia de las discontinuidades rocosas al esfuerzo cortante.* International Specialized Conference on Soft Rocks.

Corwin, D., & Lesch, S. (2010). Delineating Site-Specific Management Units with Proximal Sensors. *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*, 139–165.

Cuyubamba, J. (2019). *Zonificación geomecánica para optimizar el diseño de malla de perforacion y voladura - Unidad Minera Parcoy - Consorcio Minero Horizonte S.A.* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. http://hdl.handle.net/20.500.12894/5464

De Belie, N., Monteny, J., & Taerwe, L. (2002). Apparatus for accelerated degradation testing of concrete specimens. *Materials and Structures, 35*(7), 427–433. https://doi.org/10,1007/bf02483147

De la Losa, A., Moreno, L., & Núñez, I. (2010). Calidad química de las aguas subterráneas en una zona de actividad minera (Cuenca del Bierzo-León). *Boletín Geológico y Minero, 121*(1), 103–122. http://www.igme.es/boletin/2010/121_1/9-ARTICULO 9.pdf

Decreto Supremo N.° 016-93-EM. (1993). *Reglamento sobre protección del medio ambiente.* Presidencia de la República.

Deudor, J. (2019). *Optimización del ciclo de minado para incrementar la productividad en la mina Socorro – U.P. Uchucchacua de la Compañía Minera Buenaventura S.A.A.* [Tesis de grado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1905

Diaz, D., & Vidal, A. (2015). *Evaluación de la estabilidad global del talud superior del km. 17+200 al km 18+600 del proyecto carretera ruta N° 10, tramo: Huamachuco - Puente Pallar - Juanjui, sector: Huamachuco - Sausacocha - Puente Pallar.* [Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma]. https://hdl.handle.net/20.500.14138/2370

Fatih, D. (2013). Dye removal by almond shell residues: Studies on biosorption performance and process design. *Materials Science and Engineering, 33*(5), 2821-2826. https://doi.org/10.1016/j.msec.2013,03,009

Fernández, R. (2002). *Incidencia de las actividades mineras en la calidad de las aguas subterráneas.* opsoms.org: http://www.bvsde.opsoms.org/eswww/fulltext/ repind46/inciden/inciden.html

Fetter, C., Boving, T., & Kreamer, D. (2017). *Contaminant hydrogeology.* Waveland Press.

González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica.* Pearson Educación.

Guardiola, C., García, N., Mediavilla, C., & Machuca, M. (2009). Gestión de los recursos hídricos subterráneos en el entorno de Doñana con el apoyo del modelo matemático del acuífero Almonte-Marismas. *Boletin Geologico y Minero, 120*(3), 361–376. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3112816

Hernández, M., Sanz, L., & Mancebo, J. (2014). Tratamiento de bajo coste para aguas contaminadas por actividades de minería. *Diseño y Tecnología para el Desarrollo, 1*, 131-146.

Herrera, J. (2019). *Drenaje y gestión del agua de mina.* Universidad Politécnica de Madrid.

Hudson, K., Macklin, M., & Taylor, M. (2001). Contamination of water bodies by mining. *Environmental Geochemistry and Health, 23*(1), 217-227.

Huisamen, A., & Wilkersdorfer, C. (2016). Modelling the hydrogeochemical evolution of mine water in a decommissioned opencast coal mine. *International Journal of Coal Geology, 164*, 3–12. https://doi.org/10,1016/j.coal.2016,05,006

Ingeominas. (2003). *Glorsario Técnico Minero.* Ministerio de Minas y Energía.

Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin, 68*(1), 167-182. https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032

Larenas, E. (2009). Contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos líquidos livianos en fase no acuosa. *Ciencia, 22*, 20–29.

Ley N° 29325. (2020). *Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental, modificada por la Ley N° 30011.* Congreso de la República del Perú.

López, F. (2002). Estrategias Para Proteger Las Aguas Subterráneas De La Contaminacion. *2*, 9–16. https://doi.org/10,5380/hg.v2i0,2618

Malmgren, L., Nordlund, E., & Rolund, S. (2005). Adhesion strength and shrinkage of *shotcrete*. *Tunnelling and Underground Space Technology, 20*(1), 33–48. https://doi.org/10,1016/j.tust.2004,05,002

Merino, E. (2022). *Geomorfología peruana, región fisiográfica andina y submarina. Principales unidades geomorfológicas y su importancia. Aplicación didáctica.* Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle. http://repositorio.une.edu.pe/handle/20.500.14039/7862

Ministerio de Energía y Minas. (2006). *Guía para la Elaboración de Planes de Cierre de Minas.*

Moral, F., Terrón, J., & Silva, J. (2010). Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research, 106*(2), 335–343. https://doi.org/10,1016/j.still.2009.12,002

Ordoñez, J. (2011). *Cartilla técnica: Aguas subterráneas-acuíferos.* Sociedad Geográfica de Lima.

Pedrinaci, E. (2012). Alfabetización en Ciencias de la Tierra, una propuesta necesaria. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 20*(2), 133. https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/257532

Pickett, A., & Thomas, A. (2013). *Where Are We Now with Sprayed Concrete Lining in Tunnels.* Tunnelling Journal.

Quarteroni, A., Sacco, R., & Saleri, F. (2010). *Numerical mathematics.* Springer.

Rhoaders, J., Chanduvi, S., & Lesch, S. (1999). *Soil salinity assessment :methods and interpretation of electrical conductivity measurements.* Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Rojas, C., Bocanegra, J., & Mariño, J. (2014). Biodiversidad y servicios ecosistémicos en la gestión del suelo-subsuelo. *Revista Opera*(14), 9-26. https://www.redalyc.org/pdf/675/67540024002.pdf

Roldán, P. (2011). *Modelo matemático.* artybol1.

Romero, M., Diego, F., & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: Su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiologia, 44*(2), 1-14. https://www.redalyc.org/pdf/2232/223214848008.pdf

Rosado, S. (2015). *Rocas Que Favorecen La Infiltración Del Agua, Efectos En El Comportamiento Geomecánico Mina Zoila – Cerro De Pasco.* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro del Perú]. http://hdl.handle.net/20.500.12894/1367

Sánchez, A., & León, W. (2000). Importancia de la clasificación litoestratigráfica y su implicancia en el cartografiado geológico del territorio peruano. *Congreso Peruano de Geología, 10*, 116-131. https://hdl.handle.net/20.500.12544/3644

Saw, H., Villaescusa, E., Windsor, C., & Thompson, A. (2013). Laboratory testing of steel fibre reinforced *shotcrete*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 57*, 167–171. https://doi.org/10,1016/j.ijrmms.2012,08,008

Sharma, H., & Krishna, R. (2004). *Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies.* John Wiley & Sons.

Tapia, J. (2008). *Universidad nacional de san agustín de Arequipa facultad de geología, geofísica y minas.*

Tapia, J. (2017). *Diseño y aplicación del shotcrete vía húmeda como elemento de sostenimiento en Labores Mineras – Inpecon SAC – Mina Chipmo CIA Minera Buenaventura Unidad Orcopampa.* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín]. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3397

Tovar, J. (2005). *El agua subterránea en el medio ambiente minero peruano.* Ministerio de Energia y Minas - Perú.

Valenzuela, G., & Buendía, C. (2020). *Evaluación geológica para el cálculo de reservas y estimación de recursos minerales del prospecto minero Chaupiloma 2007.* [Tesis de grado, Universidad Continental]. https://hdl.handle.net/20.500.12394/7892

Vinatea, L. (2012). *Shotcrete : ¿ método por vía seca o vía húmeda ?.* Seguridad Minera. https://doi.org/https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/metodo-por-via-seca-o-via-humeda/

Wasserman, G., Liu, X., Lolacono, N., Kline, J., Popovac, D., Morina, N., . . . Graziano, J. (2003). Lead exposure and intelligence in 7-year-old children: The Yugoslavia prospective study. *Environmental Health Perspectives, 105*(9), 1178-1183. https://doi.org/10.1289/ehp.97105956

Zhang, C., Deng, J., Liu, J., & Sun, C. (2019). Environmental impact of aluminum pollution. *Journal of Hazardous Materials, 25*(4), 226-235.

Zheng, C., & Bennett, G. (2002). *Applied contaminant transport modeling.* Wiley-Interscience.

ANEXOS

ANEXO 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Interrogante General	Hipótesis General	Objetivo General	Variables		Indicador	Aplicación Estadística
			Independiente	Dependiente		
¿Cuál es el modelo matemático para la nueva composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados a partir del lanzamiento de *shotcrete* en las unidades mineras subterráneas?	El modelo matemático de la nueva composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados a partir del lanzamiento de *shotcrete* en unidades mineras subterráneas está determinada por los aditivos, cemento, variaciones en el pH, grado de turbidez y reacciones químicas del agua residual.	Determinar el modelo matemático para la nueva composición química de las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados a partir del lanzamiento de *shotcrete* en la minería subterránea.	Ayuda memoria El indicador es un valor cuantificable, relacionado a un estándar, norma o promedio. Ejemplo: CO_2= 400 ppm. Aplicación estadística: ANDEVA, para determinar diferencias entre las diferentes dosis de gel y disminución de la concentración de Hg.			
Interrogantes específicas	Hipótesis específicas	Objetivos específicos				
a) ¿Cuál es la composición química que comprende a los parámetros fisicoquímicos del agua residual (conductividad, la dureza, el total de sólidos disueltos - TDS y el pH) con añadido de "*shotcrete*" en un medio acuoso de las unidades	a) La combinación química que se genera a partir de los aditivos y cemento de las aguas residuales, recreados en un laboratorio químico certificado, es nociva para la calidad de agua que se infiltra en los acuíferos confinados.	a) Determinar la nueva composición química en mg/l que comprende a los parámetros fisicoquímicos del agua residual (conductividad, la dureza, el total de sólidos disueltos - TDS y el pH) con añadido de "*shotcrete*" en un medio acuoso de las unidades	Lanzamiento de *shotcrete* en minería subterránea.	Nueva composición química del agua residual en los acuíferos	Volumen de *Shotcrete* Presencia de sólidos, metales, características físico-químicas, metales.	ANOVA, para determinar en 1 unidad de volumen de agua residual recreada en laboratorio (1 litro) los niveles de agua residual, nivel de

mineras subterráneas bajo condiciones laboratoriales?		mineras subterráneas bajo condiciones laboratoriales.			Aplicaciones de *shotcrete* por día.	turbidez y el contenido de los sólidos en suspensión.
b) ¿Qué productos se generan a partir de la reacción de los compuestos químicos que comprende a los parámetros fisicoquímicos del agua residual (conductividad, la dureza, el total de sólidos disueltos - TDS y el pH) con añadido de "*shotcrete*" en un medio acuoso de las unidades mineras subterráneas bajo condiciones laboratoriales?	b) A partir de un modelo matemático se determinan los productos que se generan al producirse las reacciones de los compuestos químicos, aditivos y cemento en las aguas residuales que se infiltran en los acuíferos confinados.	b) 2. Identificar los productos que se generan a partir de la reacción de los compuestos químicos en mg/l que comprende a los parámetros fisicoquímicos del agua residual (conductividad, la dureza, el total de sólidos disueltos - TDS y el pH) con añadido de "*shotcrete*" en un medio acuoso de las unidades mineras subterráneas bajo condiciones laboratoriales.	Técnica de sostenimiento que consiste en proyectar una mezcla de concreto neumáticamente sobre las superficies de las excavaciones mineras. Esta mezcla, compuesta por cemento, agregados, agua y aditivos, una vez aplicada, forma un soporte estructural adicional a los túneles y galerías. Como resultado del endurecimiento del *shotcrete* se produce agua residual.	Conjunto de elementos y compuestos químicos presentes en el agua que ha sido afectada por las actividades de lanzamiento de *shotcrete* y se ha infiltrado en los acuíferos subterráneos	Conductividad eléctrica pH del agua Concentración de sólidos disueltos totales	ANOVA, para determinar en 1 unidad de volumen de agua residual recreada en laboratorio (1 litro) los productos que se generan a partir de la reacción de los compuestos químicos.

ANEXO 02: CÁLCULOS DE LA MODELACIÓN

Resultado de los diferentes análisis de varianza y diferencias estadísticas significativas

1.1. Aluminio

Tabla 1.1

Análisis de varianza para contenido de aluminio

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	3,5828	4	0,8957	17,3065	<0,0001
Tiempo	6,6771	2	3,3385	64,5065	<0,0001
Área	1,0922	2	0,5461	10,5519	0,0003
Tiempo*Área	0,0788	4	0,0197	0,3807	0,8207
Error	1,6562	32	0,0518		
Total	13,0871	44			

Tabla 1.2

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de aluminio

Mina	Medias	n	E.E.	
Andaychagua	1,37	9	0,0758	A
Atacocha	0,8886	9	0,0758	B
Milpo	0,7333	9	0,0758	B
San Cristóbal	0,6252	9	0,0758	B
Carahuacra	0,6004	9	0,0758	B

Tabla 1.3

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de aluminio

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	1,2722	15	0,0587	A
48	0,9203	15	0,0587	B
24	0,3381	15	0,0587	C

Tabla 1.4

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de aluminio

Área	Medias	n	E.E.	
3	1,0281	15	0,0587	A
2	0,8553	15	0,0587	A
1	0,6471	15	0,0587	B

Tabla 1.5

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de aluminio*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	1,4534	5	0,1017	A
72	2	1,3354	5	0,1017	AB
48	3	1,1558	5	0,1017	ABC
72	1	1,0278	5	0,1017	ABC
48	2	0,8982	5	0,1017	BCD
48	1	0,7068	5	0,1017	CDE
24	3	0,4752	5	0,1017	DEF
24	2	0,3324	5	0,1017	EF
24	1	0,2066	5	0,1017	F

1.2. Bario

Tabla 1.6

Análisis de varianza para contenido de bario

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	0,4677	4	0,1169	2,5453	0,0585
Tiempo	0,4585	2	0,2293	4,991	0,013
Área	0,4288	2	0,2144	4,6671	0,0167
Tiempo*Área	0,1981	4	0,0495	1,078	0,3837
Error	1,4699	32	0,0459		
Total	3,0229	44			

Tabla 1.7

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de bario

Mina	Medias	n	E.E.	
San Cristóbal	0,3335	9	0,0714	A
Carahuacra	0,2177	9	0,0714	A
Atacocha	0,0875	9	0,0714	A
Andaychagua	0,0859	9	0,0714	A
Milpo	0,0718	9	0,0714	A

Tabla 1.8

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de bario

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	0,2638	15	0,0553	A
48	0,1912	15	0,0553	AB
24	0,0228	15	0,0553	B

Tabla 1.9

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de bario

Área	Medias	n	E.E.	
3	0,2967	15	0,0553	A
2	0,1014	15	0,0553	B
1	0,0796	15	0,0553	B

Tabla 1.10

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de bario*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	0,5009	5	0,0958	A
48	3	0,3537	5	0,0958	A B
72	2	0,1681	5	0,0958	A B
72	1	0,1225	5	0,0958	A B
48	2	0,1172	5	0,0958	A B
48	1	0,1025	5	0,0958	A B
24	3	0,0356	5	0,0958	B
24	2	0,019	5	0,0958	B
24	1	0,0139	5	0,0958	B

1.3. Calcio

Tabla 1.11

Análisis de varianza para contenido de calcio

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	196962,478	4	49240,6194	81,744	<0,0001
Tiempo	71811,4586	2	35905,7293	59,6069	<0,0001
Área	30857,8747	2	15428,9373	25,6135	<0,0001
Tiempo*Área	5145,3626	4	1286,3407	2,1354	0,0992
Error	19276,0261	32	602,3758		
Total	324053,2	44			

Tabla 1.12

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de calcio

Mina	Medias	n	E.E.	
Carahuacra	268	9	8,1811	A
Andaychagua	110,2778	9	8,1811	B
San Cristóbal	103,5667	9	8,1811	B
Milpo	101,8656	9	8,1811	B
Atacocha	96,2256	9	8,1811	B

Tabla 1.13

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de calcio

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	176,606	15	6,3371	A
48	149,682	15	6,3371	B
24	81,6733	15	6,3371	C

Tabla 1.14

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de calcio

Área	Medias	n	E.E.	
3	170,4533	15	6,3371	A
2	130,4867	15	6,3371	B
1	107,0213	15	6,3371	C

Tabla 1.15

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de calcio*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	228,22	5	10,9761	A
48	3	184,98	5	10,9761	AB
72	2	168,2	5	10,9761	BC
48	2	139,74	5	10,9761	BCD
72	1	133,398	5	10,9761	CDE
48	1	124,326	5	10,9761	CDE
24	3	98,16	5	10,9761	DEF
24	2	83,52	5	10,9761	EF
24	1	63,34	5	10,9761	F

1.4. Cobre

Tabla 1.16

Análisis de varianza para contenido de cobre

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	0,0365	4	0,0091	0,9081	0,471
Tiempo	0,1461	2	0,0731	7,2681	0,0025
Área	0,1158	2	0,0579	5,7626	0,0073
Tiempo*Área	0,1462	4	0,0365	3,636	0,015
Error	0,3217	32	0,0101		
Total	0,7663	44			

Tabla 1.17

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de cobre

Mina	Medias	n	E.E.	
Milpo	0,1336	9	0,0334	A
Carahuacra	0,0752	9	0,0334	A
Atacocha	0,0655	9	0,0334	A
Andaychagua	0,061	9	0,0334	A
San Cristóbal	0,0554	9	0,0334	A

Tabla 1.18

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de cobre

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	0,1549	15	0,0259	A
48	0,0611	15	0,0259	B
24	0,0185	15	0,0259	B

Tabla 1.19

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de cobre

Área	Medias	n	E.E.	
3	0,149	15	0,0259	A
2	0,0525	15	0,0259	B
1	0,0329	15	0,0259	B

Tabla 1.20

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de cobre*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	0,3384	5	0,0448	A
48	3	0,0906	5	0,0448	B
72	2	0,0738	5	0,0448	B
48	2	0,0549	5	0,0448	B
72	1	0,0525	5	0,0448	B
48	1	0,0377	5	0,0448	B
24	2	0,0289	5	0,0448	B
24	3	0,018	5	0,0448	B
24	1	0,0085	5	0,0448	B

1.5. Estroncio

Tabla 1.21

Análisis de varianza para contenido de estroncio

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	6,0868	4	1,5217	40,5837	<0,0001
Tiempo	3,4164	2	1,7082	45,557	<0,0001
Área	0,3699	2	0,185	4,9326	0,0136
Tiempo*Área	0,0025	4	0,0006	0,0167	0,9994
Error	1,1999	32	0,0375		
Total	11,0755	44			

Tabla 1.22

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de estroncio

Mina	Medias	n	E.E.	
Carahuacra	1,2433	9	0,0645	A
Milpo	0,7952	9	0,0645	B
Andaychagua	0,7444	9	0,0645	B
San Cristóbal	0,6826	9	0,0645	B
Atacocha	0,0914	9	0,0645	C

Tabla 1.23

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de estroncio

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	0,9439	15	0,05	A
48	0,8659	15	0,05	A
24	0,3243	15	0,05	B

Tabla 1.24

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de estroncio

Área	Medias	n	E.E.	
3	0,825	15	0,05	A
2	0,706	15	0,05	AB
1	0,6031	15	0,05	B

Tabla 1.25

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de estroncio*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	1,0541	5	0,0866	A
48	3	0,9926	5	0,0866	A
72	2	0,9353	5	0,0866	A
48	2	0,8548	5	0,0866	A
72	1	0,8424	5	0,0866	A
48	1	0,7503	5	0,0866	AB
24	3	0,4283	5	0,0866	BC
24	2	0,328	5	0,0866	C
24	1	0,2167	5	0,0866	C

1.6. Hierro

Tabla 1.26

Análisis de varianza para contenido de hierro

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	0,221	4	0,0553	0,9023	0,4742
Tiempo	12,7628	2	6,3814	104,1981	<0,0001
Área	2,095	2	1,0475	17,1042	<0,0001
Tiempo*Área	0,5297	4	0,1324	2,1622	0,0958
Error	1,9598	32	0,0612		
Total	17,5683	44			

Tabla 1.27

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de hierro

Mina	Medias	n	E.E.	
San Cristóbal	1,2914	9	0,0825	A
Andaychagua	1,2828	9	0,0825	A
Milpo	1,2266	9	0,0825	A
Atacocha	1,1749	9	0,0825	A
Carahuacra	1,1037	9	0,0825	A

Tabla 1.28

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de hierro

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	1,8039	15	0,0639	A
48	1,3294	15	0,0639	B
24	0,5143	15	0,0639	C

Tabla 1.29

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de hierro

Área	Medias	n	E.E.	
3	1,4986	15	0,0639	A
2	1,1739	15	0,0639	B
1	0,9751	15	0,0639	B

Tabla 1.30

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de hierro*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	2,0848	5	0,1107	A
72	2	1,7958	5	0,1107	AB
48	3	1,7954	5	0,1107	AB
72	1	1,5312	5	0,1107	BC
48	2	1,2062	5	0,1107	CD
48	1	0,9865	5	0,1107	DE
24	3	0,6156	5	0,1107	EF
24	2	0,5198	5	0,1107	EF
24	1	0,4076	5	0,1107	F

1.7. Magnesio

Tabla 1.21

Análisis de varianza para contenido de magnesio

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	0,992	4	0,248	5.8805	0,0012
Tiempo	0,176	2	0,088	2,0864	0,1407
Área	0,7407	2	0,3704	8.7825	0,0009
Tiempo*Área	0,03	4	0,0075	0,1779	0,9481
Error	1,3495	32	0,0422		
Total	3,2882	44			

Tabla 1.22

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de magnesio

Mina	Medias	n	E.E.	
Carahuacra	0,5376	9	0,0685	A
Milpo	0,2992	9	0,0685	AB
San Cristóbal	0,2787	9	0,0685	AB
Atacocha	0,1414	9	0,0685	B
Andaychagua	0,1239	9	0,0685	B

Tabla 1.23

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de magnesio

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	0,357	15	0,053	A
48	0,2667	15	0,053	A
24	0,2047	15	0,053	A

Tabla 1.24

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de magnesio

Área	Medias	n	E.E.	
3	0,4392	15	0,053	A
2	0,2635	15	0,053	AB
1	0,1257	15	0,053	B

Tabla 1.25

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de magnesio*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	0,537	5	0,0918	A
48	3	0,452	5	0,0918	AB
72	2	0,338	5	0,0918	AB
24	3	0,3287	5	0,0918	AB
24	2	0,2357	5	0,0918	AB
48	2	0,2168	5	0,0918	AB
72	1	0,196	5	0,0918	AB
48	1	0,1314	5	0,0918	AB
24	1	0,0497	5	0,0918	B

1.8. Molibdeno

Tabla 1.26

Análisis de varianza para contenido de molibdeno

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	0,1405	4	0,0351	2,7542	0,0448
Tiempo	0,0432	2	0,0216	1,6955	0,1996
Área	0,0772	2	0,0386	3,0284	0,0624
Tiempo*Área	0,0383	4	0,0096	0,7505	0,5651
Error	0,4081	32	0,0128		
Total	0,7074	44			

Tabla 1.27

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de molibdeno

Mina	Medias	n	E.E.	
Carahuacra	0,1561	9	0,0376	A
Atacocha	0,0216	9	0,0376	A
Andaychagua	0,017	9	0,0376	A
Milpo	0,0153	9	0,0376	A
San Cristóbal	0,0124	9	0,0376	A

Tabla 1.28

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de molibdeno

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	0,0777	15	0,0292	A
48	0,0526	15	0,0292	A
24	0,0031	15	0,0292	A

Tabla 1.29

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de molibdeno

Área	Medias	n	E.E.	
3	0,1027	15	0,0292	A
2	0,0212	15	0,0292	A
1	0,0096	15	0,0292	A

Tabla 1.30

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de molibdeno*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	0,1747	5	0,0505	A
48	3	0,1285	5	0,0505	A

72	2	0,0413	5	0,0505	A
48	2	0,0195	5	0,0505	A
72	1	0,0171	5	0,0505	A
48	1	0,0098	5	0,0505	A
24	3	0,0048	5	0,0505	A
24	2	0,0027	5	0,0505	A
24	1	0,0018	5	0,0505	A

1.9. Plomo

Tabla 1.31

Análisis de varianza para contenido de plomo

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	0,01	4	0,0025	9,6282	<0,0001
Tiempo	0,0036	2	0,0018	6,9168	0,0032
Área	0,0013	2	0,0006	2,4432	0,1029
Tiempo*Área	0,0005	4	0,0001	0,5093	0,7293
Error	0,0083	32	0,0003		
Total	0,0238	44			

Tabla 1.32

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de plomo

Mina	Medias	n	E.E.	
Carahuacra	0,0438	9	0,0054	A
Atacocha	0,0079	9	0,0054	B
Milpo	0,0064	9	0,0054	B
Andaychagua	0,0062	9	0,0054	B
San Cristóbal	0,0057	9	0,0054	B

Tabla 1.33

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de plomo

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	0,0236	15	0,0042	A
48	0,0163	15	0,0042	AB
24	0,0021	15	0,0042	B

Tabla 1.34

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de plomo

Área	Medias	n	E.E.	
3	0,0197	15	0,0042	A
2	0,0154	15	0,0042	A
1	0,0069	15	0,0042	A

Tabla 1.35

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de plomo*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	0,0316	5	0,0072	A
72	2	0,0268	5	0,0072	A
48	3	0,0248	5	0,0072	A
48	2	0,0172	5	0,0072	A
72	1	0,0124	5	0,0072	A
48	1	0,007	5	0,0072	A
24	3	0,0027	5	0,0072	A
24	2	0,0021	5	0,0072	A
24	1	0,0013	5	0,0072	A

1.10. Potasio

Tabla 1.36

Análisis de varianza para contenido de potasio

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	359,5071	4	89,8768	0,4555	0,7677
Tiempo	46228,5889	2	23114,2945	117,1457	<0,0001
Área	9324,938	2	4662,469	23,6299	<0,0001
Tiempo*Área	2357,6512	4	589,4128	2,9872	0,0334
Error	6313,9967	32	197,3124		
Total	64584,6819	44			

Tabla 1.37

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de potasio

Mina	Medias	n	E.E.	
Andaychagua	94,5111	9	4,6823	A
San Cristóbal	94,0222	9	4,6823	A
Milpo	93,6122	9	4,6823	A
Atacocha	89,1344	9	4,6823	A
Carahuacra	87,6444	9	4,6823	A

Tabla 1.38

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de potasio

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	124,4933	15	3,6269	A
48	102,6073	15	3,6269	B
24	48,254	15	3,6269	C

Tabla 1.39

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de potasio

Área	Medias	n	E.E.	
3	110,1207	15	3,6269	A
2	90,2773	15	3,6269	B
1	74,9567	15	3,6269	C

Tabla 1.40

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de potasio*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	152,7	5	6,2819	A
48	3	124,32	5	6,2819	AB
72	2	121,38	5	6,2819	B
72	1	99,4	5	6,2819	BC
48	2	96,032	5	6,2819	BC
48	1	87,47	5	6,2819	C
24	2	53,42	5	6,2819	D
24	3	53,342	5	6,2819	D
24	1	38	5	6,2819	D

1.11. Sodio

Tabla 1.41

Análisis de varianza para contenido de sodio

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	75565,0222	4	18891,2556	7,7605	0,0002
Tiempo	1106430,18	2	553215,089	227,2614	<0,0001
Área	141976,044	2	70988,0222	29,162	<0,0001
Tiempo*Área	15958,7556	4	3989,6889	1,639	0,1886
Error	77896,5778	32	2434,2681		
Total	1417826,58	44			

Tabla 1.42

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de sodio

Mina	Medias	n	E.E.	
Carahuacra	460,3333	9	16,4461	A
Milpo	417,5556	9	16,4461	AB
Andaychagua	368,2222	9	16,4461	BC
San Cristóbal	364,8889	9	16,4461	BC
Atacocha	349,8889	9	16,4461	C

Tabla 1.43

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de sodio

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	521,1333	15	12,7391	A
48	483,9333	15	12,7391	A
24	171,4667	15	12,7391	B

Tabla 1.44

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de sodio

Área	Medias	n	E.E.	
3	465,8	15	12,7391	A
2	381,2	15	12,7391	B
1	329,5333	15	12,7391	C

Tabla 1.45

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de sodio*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	604,4	5	22,0648	A
48	3	582	5	22,0648	A
72	2	514,8	5	22,0648	AB

48	2	462	5	22,0648	BC
72	1	444,2	5	22,0648	BC
48	1	407,8	5	22,0648	C
24	3	211	5	22,0648	D
24	2	166,8	5	22,0648	D
24	1	136,6	5	22,0648	D

1.12. Vanadio

Tabla 1.46

Análisis de varianza para contenido de vanadio

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	0,0001	4	1,30E-05	1,6316	0,1904
Tiempo	0,0007	2	0,0004	45,986	<0,0001
Área	0,0002	2	0,0001	10,7042	0,0003
Tiempo*Área	2,60E-05	4	6,40E-06	0,8339	0,5137
Error	0,0002	32	7,70E-06		
Total	0,0012	44			

Tabla 1.47

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de vanadio

Mina	Medias	n	E.E.	
Atacocha	0,0091	9	0,0009	A
Carahuacra	0,0085	9	0,0009	A
Andaychagua	0,0071	9	0,0009	A
San Cristóbal	0,007	9	0,0009	A
Milpo	0,0062	9	0,0009	A

Tabla 1.48

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de vanadio

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	0,0121	15	0,0007	A
48	0,0083	15	0,0007	B
24	0,0024	15	0,0007	C

Tabla 1.49

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de vanadio

Área	Medias	n	E.E.	
3	0,01	15	0,0007	A
2	0,0074	15	0,0007	B
1	0,0054	15	0,0007	B

Tabla 1.50

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de vanadio*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	0,0156	5	0,0012	A
72	2	0,0119	5	0,0012	AB
48	3	0,0108	5	0,0012	AB
72	1	0,0087	5	0,0012	BC
48	2	0,0079	5	0,0012	BCD
48	1	0,0061	5	0,0012	BCDE
24	3	0,0037	5	0,0012	CDE
24	2	0,0024	5	0,0012	DE
24	1	0,0012	5	0,0012	E

1.13. Zinc

Tabla 1.51

Análisis de varianza para contenido de zinc

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Mina	0,2196	4	0,0549	3,6175	0,0153
Tiempo	1,8138	2	0,9069	59,7476	<0,0001
Área	0,4663	2	0,2331	15,3591	<0,0001
Tiempo*Área	0,0612	4	0,0153	1,0083	0,4177
Error	0,4857	32	0,0152		
Total	3,0467	44			

Tabla 1.52

Prueba de medias Tukey de minas sobre contenido de zinc

Mina	Medias	n	E.E.	
Carahuacra	0,5325	9	0,0411	A
Andaychagua	0,4273	9	0,0411	AB
Milpo	0,4077	9	0,0411	AB
San Cristóbal	0,3803	9	0,0411	AB
Atacocha	0,319	9	0,0411	B

Tabla 1.53

Prueba de medias Tukey de tiempo sobre contenido de zinc

Tiempo	Medias	n	E.E.	
72	0,6191	15	0,0318	A
48	0,48	15	0,0318	B
24	0,1411	15	0,0318	C

Tabla 1.54

Prueba de medias Tukey de área sobre contenido de zinc

Área	Medias	n	E.E.	
3	0,5429	15	0,0318	A
2	0,4032	15	0,0318	B
1	0,2941	15	0,0318	B

Tabla 1.55

*Prueba de medias Tukey de tiempo*área sobre contenido de zinc*

Tiempo	Área	Medias	n	E.E.	
72	3	0,7684	5	0,0551	A
48	3	0,6501	5	0,0551	AB
72	2	0,6196	5	0,0551	AB
72	1	0,4693	5	0,0551	BC
48	2	0,4637	5	0,0551	BCD
48	1	0,3261	5	0,0551	CDE
24	3	0,2101	5	0,0551	DE
24	2	0,1261	5	0,0551	E
24	1	0,087	5	0,0551	E

Resultado de los diferentes análisis de componentes principales

Tabla 2.1

Matriz de correlación y probabilidades

	Al	Ba	Ca	Cu	Sr	Fe	Mg	Mo	Pb	K	Na	Va	Zn
Al													
Ba	0,17												
Ca	0,09	0,00											
Cu	0,04	0,21	0,02										
Sr	0,06	0,00	<0,0001	0,06									
Fe	<0,0001	0,00	0,00	0,00	0,00								

Mg	0,88	<0,0001	<0,0001	0,11	<0,0001	0,01						
Mo	0,34	0,05	<0,0001	0,03	0,00	0,01	<0,0001					
Pb	0,26	0,02	<0,0001	0,09	<0,0001	0,00	<0,0001	<0,0001				
K	<0,0001	0,00	0,00	0,00	0,00	<0,0001	0,01	0,09	0,02			
Na	<0,0001	0,00	<0,0001	0,00	<0,0001	<0,0001	0,00	0,00	<0,0001	<0,0001		
Va	<0,0001	0,00	<0,0001	0,00	0,01	<0,0001	0,00	0,00	<0,0001	<0,0001	<0,0001	
Zn	<0,0001	0,00	<0,0001	0,00	<0,0001	<0,0001	0,00	0,00	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Tabla 2.2

Matriz de auto vectores lambda

Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	7,6409	0,5878	0,5878
2	2,0255	0,1558	0,7436
3	0,8982	0,0691	0,8127
4	0,7329	0,0564	0,869
5	0,5804	0,0446	0,9137
6	0,3256	0,025	0,9387
7	0,2753	0,0212	0,9599
8	0,1786	0,0137	0,9736
9	0,1328	0,0102	0,9839
10	0,0863	0,0066	0,9905
11	0,0569	0,0044	0,9949
12	0,0388	0,003	0,9979
13	0,0279	0,0021	1

Tabla 2.3

Matriz de correlaciones con las variables originales

Variables	e1	e2	e3
Aluminio	0,2132	0,4569	-0,0625
Bario	0,2138	-0,0737	0,7093
Calcio	0,3	-0,3028	-0,1124
Cobre	0,1888	0,1398	-0,4532

Estroncio	0,2745	-0,2125	0,1516
Hierro	0,3126	0,2928	0,066
Magnesio	0,2423	-0,3701	0,2358
Molibdemo	0,2381	-0,3479	-0,3617
Plomo	0,2773	-0,3498	-0,2069
Potasio	0,3002	0,3373	0,0815
Sodio	0,3332	0,1179	0,0046
Vanadio	0,311	0,1755	-0,1034
Zinc	0,3464	0,0691	0,0325